

Treball de Fi de Màster

## **Màster Universitari en Enginyeria Industrial**

### **Disseny d'una cèl·lula robòtica d'inspecció**

#### **MEMÒRIA**

**Autor:** David Luna i Pérez  
**Director:** Ramon Costa Castelló  
**Convocatòria:** Juny 2018



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





# Resum

L'objectiu del projecte és el de realitzar el disseny d'una cèl·lula robotitzada que ha de realitzar tasques d'inspecció. L'empresa que ha comprat la cèl·lula és una companyia sueca que fabrica peces de carrosseria de camió i ha demanat certes especificacions tant de pes com de mesures.

El projecte s'ha desenvolupat durant una estada en pràctiques a l'empresa Asea Brown Boveri (ABB) de Sant Quirze del Vallés dintre del departament de Visió i Metrologia (3DVM). ABB té un producte estandarditzat que és una cèl·lula de metrologia anomenada FlexInspect. Degut a les característiques de dimensió i pes d'algunes de les peces que es volen inspeccionar s'ha decidit crear una cèl·lula personalitzada des de zero.

L'objectiu del treball és determinar quins elements mecànics i físics incorporar a la cèl·lula robotitzada per satisfer les especificacions del client i també complir la normativa europea de seguretat i salut. Aquests elements són un capçal Sidio que conté tots els sistemes necessaris per l'extracció del núvol de punts que defineix la superfície de la peça a mesurar, un robot articulat per situar el capçal en la posició i orientació desitjats, una taula rotatòria per col·locar les peces a mesurar i poder-les moure per ajudar en el moviment del robot i un nucli amb tots els dispositius requerits pel funcionament de la cèl·lula

El mètode seguit per a fer el disseny és el de decidir els elements necessaris per la cèl·lula per tal de satisfer les especificacions del client, els elements de seguretat que ha d'incorporar per tal de complir amb les directives europees de seguretat, principalment la 2006/42/CE i totes les normes ISO que allà s'hi refereixen (ISO 10218, ISO 12100 etc.) relativa a maquinaria i finalment s'ha elaborat un entorn virtual amb la distribució d'aquests elements.

Un cop triats els diferents elements es dissenya la distribució en planta i, després d'assegurar que es compleixen amb les normes de seguretat, es dissenya la cèl·lula en un entorn tridimensional per mostrar el resultat al client i poder treballar posteriorment. Un cop es té el vist-i-plau es realitzen les comandes dels diferents elements, es porten al taller de Sant Quirze i es monta la cèl·lula.



# Índex

Resum .....	1
Índex .....	3
Introducció .....	5
1. Antecedents .....	7
1.1. Tecnologia d'inspecció actual.....	8
1.2. Altres tecnologies de metrologia .....	9
2. Components de la cèl·lula .....	12
2.1. Capçal de llum estructurada.....	12
2.1.1. Sidio Airus .....	14
2.1.2. Placa de calibratge .....	16
2.2. Robot.....	18
2.3. Controlador IRC5 .....	21
2.3.1. Armari .....	21
2.3.2. Ordinador i sistema operatiu .....	23
2.3.3. Targeta de seguretat .....	25
2.4. Taula rotatòria.....	27
2.5. Utillatges .....	29
3. Seguretats .....	32
3.1. Seguretat en els robots ABB .....	33
3.2. Elements de seguretat físics .....	35
3.3. SafeMove .....	36
3.4. Sistema RFID d'identificació. ....	38
3.5. Altres sistemes i mesures de seguretat.....	40
4. Disseny de la cèl·lula.....	45
5. Planificació.....	51

6.	Pressupost .....	52
7.	Impacte ambiental.....	53
	Conclusions.....	54
	Bibliografia .....	56

# Introducció

El projecte actual es centra en el disseny d'una cèl·lula robotitzada de metrologia que ha de fer-se servir per realitzar tasques d'inspecció per millorar el procés de control de qualitat d'una fàbrica automobilística a la ciutat d'Umea, Suècia.

La nau de destí és una factoria de components de carrosseria de camió que poden arribar a adquirir grans dimensions i pes. La peça que serà la més restrictiva per motius de dimensió i massa és de 600 kg. La longitud que pot adquirir és aproximadament 2 metres d'alt i 1,5 d'ample, sense comptar amb el volum i pes que pot implicar un utilatge per suportar aquesta peça. La cèl·lula d'ABB estàndard de metrologia està pensada per peces que pesin màxim 400 kg i amb unes dimensions màximes al voltant dels 1500mm així que s'ha decidit crear una des de zero que pugui treballar amb les especificacions demanades.

Aprofitant aquesta situació, el client ha demanat també que la cèl·lula pugui ampliar-se en un futur per incorporar una segona taula on poder fer mesures durant el procés de càrrega i descàrrega de la primera per optimitzar el nombre de peces inspeccionades per hora. Aquesta modificació es tindrà en compte a l'hora de realitzar el disseny per assegurar que la futura ampliació és possible però no s'aplicarà en el marc del projecte actual.

Actualment tot el control de qualitat d'aquesta factoria està externalitzat a una companyia que realitza les inspeccions fora de la línia. Aquesta empresa fa el control de qualitat amb màquines CMM <sup>1</sup>. Aquesta tecnologia consisteix en situar la peça en l'espai de treball d'un robot cartesià que té un palpador com a eina i que es mou al llarg de tota la peça per extreure les coordenades X,Y,Z per cada punt de la superfície. Tot i que ofereix molta precisió, requereix força temps extreure el núvol de punts que defineix la superfície i per tant es pot trigar força a obtenir els resultats que permetin detectar un possible error que aparegui en el procés productiu.

L'objectiu de la instal·lació de la cèl·lula és reduir el temps requerit per fer una inspecció completa a una peça determinada sense perdre qualitat, cosa que permet detectar més ràpidament un possible error del sistema productiu i reduir així les pèrdues que aquesta fallada

---

*1 Coordinate-measuring machines (mesura de coordenades amb palpador)*

pogués ocasionar. Per a fer això, aquest treball abarca el procés de determinar quins són els elements mecànics i físics que ha d'incorporar la cèl·lula robotitzada i la seva distribució en l'espai disponible per tal de satisfer les especificacions del client i també complir la normativa europea de seguretat i salut. La posterior programació i simulació de trajectòries queda fora de l'abast d'aquest projecte però es realitzarà en un treball posterior.

L'espai disponible per la cèl·lula a la nau de destí és de 10 x 6 m, amb passadís per un dels laterals llargs, la presa de corrent a 230V en monofàsic i 400V en corrent trifàsica a 50 Hz<sup>2</sup>. Altres aspectes a tenir en compte és que la temperatura anual mitjana a la ciutat de destí és de 3°C<sup>3</sup>, cosa que pot incrementar el temps necessari per escalfar els diversos elements del sistema fins a la temperatura de treball. La llum dins de la nau de destí és principalment llum artificial amb un nivell de lluminositat dintre dels límits marcats per la legislació vigent.

Les exigències essencials de seguretat i salut que ha de complir la cèl·lula queden recollides en la Directiva 2006/42/CE de màquines, la 2014/35/UE de baixa tensió i la 2014/30/UE sobre compatibilitat electromagnètica. A part de les normatives el client ha demanat també un control de seguretat extra per software que encara que no es considera infal·libre, afegeix un cert grau de seguretat per la maquinària a una cèl·lula robotitzada que compleix la normativa de seguretat per persones.

En aquest document s'explica el procés de presa de decisió de tots els elements que ha d'incorporar la cèl·lula per tal de satisfer les necessitats i especificacions del client complint la normativa vigent. Un cop seleccionats els diferents elements s'ha buscat els espais que ocupen i s'ha realitzat una distribució en un plànol.

Posteriorment s'ha creat un sistema robòtic en un entorn virtual utilitzant un software d'ABB anomenat RobotStudio. Aquesta eina permet veure tridimensionalment els diferents objectes i s'utilitzarà per comprovar que l'espai està ben distribuït i posteriorment per a crear els diferents programes d'inspecció de la cèl·lula. Un cop feta aquesta comprovació es portaran tots els elements al taller d'ABB i es muntarà la cèl·lula respectant el disseny realitzat.

---

*2 Segons dades de WorldStandards.eu [1]*

*3 Segons dades de Climate-data.org [2]*



# 1. Antecedents

El control de qualitat<sup>4</sup> és el procediment tècnic que permet verificar si els materials, procés de fabricació i els productes determinats compleixen amb les seves respectives especificacions.

Hi ha dues estratègies a l'hora d'introduir un control de qualitat a la indústria. Es poden realitzar inspeccions per totes les peces que es produeixen o realitzar un estudi estadístic amb una petita mostra. La primera estratègia, anomenada exhaustiva, consisteix en inspeccionar la totalitat de les peces que es fabriquen en la línia de producció. La segona estratègia, anomenada inspecció per mostreig, és la més estesa i consisteix en prendre una mostra representativa de les peces d'un lot de la producció per inspeccionar-les.

El primer mètode requereix més temps i és més costós però és la única manera que es té d'assegurar la bona qualitat. Per aquest motiu s'acostuma a implementar en línies que fabriquen poques peces d'alta qualitat o que han de complir unes especificacions molt estrictes com podrien ser productes de luxe o components per màquines per fer proves mèdiques.

La segona estratègia no permet determinar la validesa de totes les peces que s'han fabricat durant el procés productiu però permet inferir mitjançant eines estadístiques si el lot al que pertanyia la mostra és bo o defectuós. És la que s'utilitza en la majoria de línies de producció on hi ha grans tirades de peces barates de fabricar on la inspecció total incrementaria molt el preu, com podria ser la fabricació d'ampolles d'aigua, i en aquelles línies on després del control de qualitat la peça queda inutilitzada, com podria ser per comprovar la resistència.

El sector de l'automoció necessita assegurar que tots els components que utilitza estan correctament fabricats ja que un component defectuós podria suposar un greu perill per a la seguretat ja que podria augmentar el risc d'accidents o els danys ocasionats en cas de col·lisió. Per aquest motiu l'estratègia que segueix la indústria automobilística amb aquests components és la de realitzar un control de qualitat amb inspeccions exhaustives.

---

*4 Instrumentación industrial[3]*

El sistema actual de control de qualitat consisteix en que es fabriquen els diferents components en tirades curtes i s'envien per lots a una empresa externa que realitza el control de qualitat. Un cop realitzat l'informe per cada una de les peces inspeccionades, aquestes es tornen a la fàbrica que decideix si incorporar-les en la línia d'assemblatge, tornar-les a mecanitzar en cas que tinguin algun defecte amb solució o rebutjar-les.

## 1.1. Tecnologia d'inspecció actual

L'empresa que realitza el control de qualitat utilitza un sistema CMM per a realitzar les inspeccions de les diferents peces. Aquests sistemes utilitzen un palpador que tradicionalment es pot moure al llarg de tres eixos ortogonals que disposen d'uns sensors que calculen la posició exacta de la punta del palpador al micròmetre (veure fig. 1).



*Fig. 1. Màquina de medició de coordenades per palpador. Font: Borbollametrology[4]*

En l'actualitat s'utilitzen models que incorporen fins a dos eixos extrems que permeten rotar el palpador per accedir a superfícies laterals. Aquest palpador es mou per tota la superfície de la peça i s'extreuen les coordenades en els 3 eixos per guardar un punt tridimensional en una plantilla de dibuix. Amb l'obtenció dels diversos punts d'interès que té la peça es poden comprovar que les entitats o característiques desitjades de la superfície de la peça estan dins dels paràmetres de disseny o estan desviats.

Aquesta tecnologia té certs avantatges però també té algun inconvenient. Els punts a favor d'aquesta tecnologia de mesura és que es pot automatitzar el procés d'extracció de dades, es poden extreure tipus d'entitats molt diferents (cercles, plans, slots, continuïtat de soldadures etc.) i que no es requereixen utensilis especials com podrien ser els calibradors passa-no passa. El principal inconvenient d'aquest mètode és que de cada mesura només s'extreu una coordenada en l'espai i, tot i que pot prendre mesures força ràpid, es requereix força temps per obtenir la informació completa d'una superfície. Per aquest motiu el procés d'inspecció no es realitza en la línia de producció sinó quan aquesta ha acabat. Així doncs s'ha d'escollir alguna altra tecnologia per definir el núvol de punts que defineix un objecte.

## 1.2. Altres tecnologies de metrologia

La companyia vol utilitzar una tècnica de metrologia diferent, que li permeti realitzar de forma automàtica tot el procés de presa de dades de les peces i de creació d'informes d'inspecció de forma més ràpida. Per agilitzar el procés d'inspecció es necessita que les tecnologies que realitzen l'extracció del núvol de punts puguin extreure diverses mesures de forma ràpida i la millor manera és extreure les dades sense contacte. Aquestes tecnologies han de permetre extreure amb força precisió la posició en coordenades cartesianes de punts de la superfície de la peça creant un mallat que defineix aquesta superfície. Les alternatives millor posicionades en el mercat són l'escàner per làser, l'escàner de tomografia per ordinador i l'escàner mitjançant llum.

El primer mètode, la inspecció per làser <sup>5</sup>, consisteix en un o diversos punters làsers que emeten uns feixos de llum. L'aparell és capaç de determinar la distància a la que es troba l'obstacle en el que el raig ha arribat i ubicar-hi un punt a l'espai depenent de la posició i orientació del punter. Aquesta tecnologia ofereix una manera molt ràpida d'obtenir un núvol de punts d'alta densitat amb la forma, el volum i la posició d'un objecte en concret però el principal inconvenient d'aquesta tecnologia és que la precisió que ofereixen els resultats no és tan elevada

---

*5 Técnicas basadas en láser para metrología de alto rango [5]*

com altres alternatives que es puguin considerar. Aquest mètode s'utilitza principalment quan la producció és molt elevada degut a la rapidesa amb la que es fan les inspeccions o quan les toleràncies imposades pel client són superiors al mil·límetre sobretot si les dimensions són molt elevades (indústria aeronàutica, eòlica etc.).

El segon mètode és la inspecció de tomografia per ordinador <sup>6</sup>. Es realitza un procés on s'emeten un seguit de rajos d'alta freqüència contra la peça i es col·loca una placa receptora d'aquests rajos darrere que mesura la quantitat de radioactivitat que es rep. Aquest procés obté uns resultats similars als que s'obtidrien al realitzar radiografies de l'objecte en qüestió en talls perpendiculars de fins a poques dècimes de mil·límetre i permet obtenir de forma molt nítida informació de l'interior i el contorn de l'objecte. Aquest mètode és el més precís per obtenir imatges internes de les peces tot i que per a treballar amb aquesta tecnologia es requereix força temps per a cada inspecció i s'han d'emetre rajos que són nocius. Per motius de seguretat i salut dels operaris s'intenta només incloure aquesta tecnologia en aquelles línies en que és indispensable obtenir un mapa intern de les peces per observar porositats o escletxes no superficials.

El tercer mètode és el de l'escaneig per tecnologia de llum estructurada<sup>7</sup>. La tècnica, com es veu en la figura 2, consisteix en la projecció utilitzant un focus de llum blanca d'un patró compost per diverses línies de llum i ombra paral·leles que, si s'observen des de punts de vistes diferents a la del projector, es veuen distorsionades. La imatge captada per una càmera situada en una perspectiva diferent a la del focus mostra la deformació geomètrica de els bandes de llum que es projecten sobre la superfície de la peça que s'està digitalitzant. La distorsió i el desplaçament observat de les línies permet, mitjançant tècniques de triangulació, una recuperació exacta de les coordenades 3D de qualsevol detall sobre la superfície de l'objecte. Així doncs, aquesta tecnologia permet obtenir un núvol de punts d'alta densitat amb precisions de desenes de micròmetres en molt poc temps.

---

*6 Inspección de las características internas utilizando la tomografía con rayos X [6]*

*7 Structured Light 3D scanning [7]*

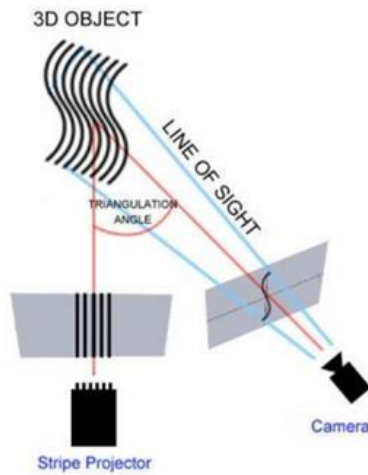


Fig. 2. Esquema captació de dades amb la tècnica de llum. Font: Structured Light 3D Scanning

Per les característiques de les peces a mesurar i el seu mètode de fabricació, principalment per premsat, no cal obtenir informació detallada de l'interior ja que el risc de tenir porositats o esquerdes és mínim. Això permet descartar la tècnica de la tomografia per evitar el risc en els operaris degut a la radiació emesa per la màquina.

A part del contorn, el volum i la posició també es busca trobar certes entitats definides en la superfície de la peça. Les dues tecnologies restants podrien realitzar la tasca correctament tot i que la tecnologia de llum pot oferir una precisió i repetibilitat en les mesures més bones que les que pot oferir la tecnologia làser.

## 2. Components de la cèl·lula

Actualment l'empresa ABB té un departament dins de la unitat de robòtica que munta i programa cèl·lules d'inspecció per tot el món. Per a realitzar el disseny del sistema d'inspecció que s'ha de muntar, s'ha tingut força en compte els elements que componen la cèl·lula estandarditzada de metrologia de la companyia, la FlexInspect.

L'element principal<sup>8</sup> i que diferencia aquest producte d'altres cèl·lules robòtiques és un escàner de llum format per un projector i una càmera que serveix per extreure les mesures. A part també inclou un robot per ubicar aquest dispositiu en les posicions i orientacions desitjades, una taula per col·locar els utilatges on posar les peces que es volen mesurar i una unitat central que contingui el controlador de la cèl·lula i tot el hardware necessari pel funcionament del sensor.

Els dos grans factors que han influït en el nou disseny de la cèl·lula són el fet que els elements a mesurar siguin més grans i pesants que el requerit per un correcte funcionament de la cèl·lula estandarditzada i que vol preparar-se el sistema per poder incorporar una segona taula d'inspecció. A part des de l'empresa que ha comprat la cèl·lula s'ha demanat uns requisits de seguretat superiors als demanats en les normatives, afegint també seguretat per software a la ja obligatòria seguretat per hardware.

### 2.1. Capçal de llum estructurada.

El capçal de llum estructurada és un dispositiu que integra els dos elements necessaris per realitzar digitalitzacions 3D i inspecció de peces. Conté un projector que pot emetre diversos patrons lumínics i que pot regular alguns paràmetres per tal de digitalitzar tant superfícies brillants com parts fosques d'una mateixa vista i alhora eliminar el màxim les pertorbacions produïdes per factors externs. També té una única càmera 2D que capta la imatge de la peça amb les línies projectades i que, amb la informació del patró emès i de la configuració de l'escàner, converteix els punts observats en la foto en un núvol de punts tridimensional.

---

<sup>8</sup> FlexInspect User Manual [8]

El fet de tenir una única càmera permet reduir el nombre de vistes sobreposades i facilita un càlcul més ràpid de les mesures preses. A part redueix molt les dimensions i pes del capçal en comparació a altres mètodes de mesura de peces en 3D com podrien ser els escàners de llum amb multi-càmera o els làser. ABB treballa actualment amb dos models de capçal de llum estructurada:

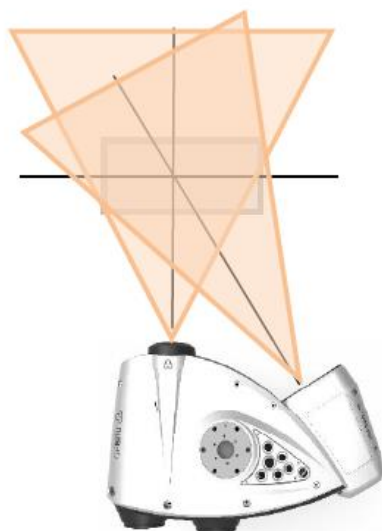
El Sidio Lite és un sistema de 8 kg amb una càmera de 2 megapíxels i que realitza digitalitzats sobre una superfície de treball de 310x220 mm, obtenint una densitat d'uns 30 píxels per mm<sup>2</sup>. Les seves dimensions reduïdes i la seva alta densitat de punts permeten minimitzar l'error comès en el procés de càlcul del núvol de punts i obtenir desviacions properes a la desena de micròmetre. Per altra banda la superfície de digitalitzat és força reduïda així que si es pretén mesurar una superfície gran es requerirà fer moltes operacions, cosa que implicaria una ampliació del temps d'inspecció.

El Sidio Airus és un sistema de 18 kg que pot ubicar 5 milions de punts en cada digitalitzat sobre una superfície de treball de 550x390 mm, obtenint una densitat de 23 píxels per mm<sup>2</sup>. Degut a que la densitat de punts és menor que en el cas del Sidio Lite i les distàncies a les que es troben els punts observats des de la càmera són majors els resultats que s'extreuen d'aquest capçal acostumen a ser lleugerament pitjors que els de l'anterior dispositiu tot i que es mantenen en el mateix ordre de magnitud.

Degut a la gran dimensió d'algunes de les peces que s'han de mesurar en aquesta cèl·lula s'ha optat per triar el capçal de Sidio Airus. Tot i que el model Lite ofereix un grau de precisió superior gràcies a la seva major densitat de punts, un dels objectius principals del projecte és el de reduir el temps necessari per realitzar un cicle d'inspecció i degut a les dimensions d'aquest capçal es requeririen moltes més etapes de digitalitzats per observar tota la superfície, cosa que augmentaria notablement el temps de cicle en comparació amb el Sidio Airus.

### 2.1.1. Sidio Airus

La principal característica d'aquest capçal és que la càmera i el projector estan girats un respecte l'altre, cosa que defineix un volum a l'espai pel que passa el feix de llum del projector i la visió de la càmera (veure fig. 3). Aquest volum és pel Sidio Airus de 550x390x200 mm i el seu centre està situat aproximadament a 450 mm davant del projector. Ja que una lleugera desviació en els angles de projecció dels dos feixos poden modificar significativament aquesta longitud i podria incrementar l'error de les mesures preses, s'utilitza un procediment en el qual es realitzen 5 digitalitzats buscant algunes referències en 5 posicions i orientacions diferents i un software calcula automàticament la posició real del centre del volum i actualitza l'eina definida en el controlador del robot.



*Fig. 3. Volum de treball del capçal Sidio. Font: FlexInspect user manual*

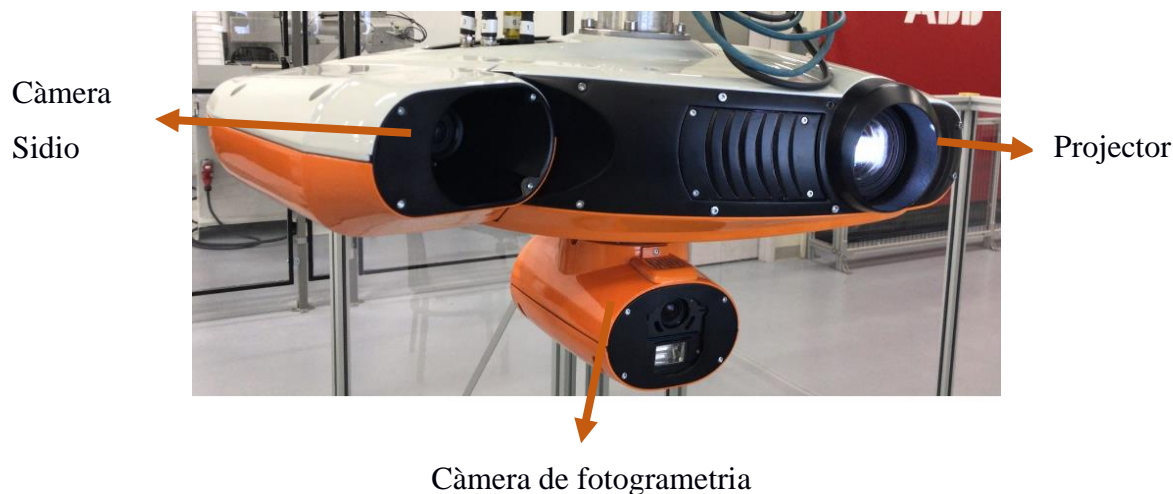
El capçal té un tercer element que és una càmera específica de fotogrametria proveïda per una empresa externa i on només s'ha d'ajustar la potència del Flash. La fotogrametria és una tècnica de mesura de coordenades 3D molt precisa, versàtil i ràpida que s'utilitza per calibrar tot el volum de treball en certes aplicacions de metrologia.

Aquest procés de calibratge consisteix en prendre imatges dels espais d'interès des de diferents posicions i angles de la càmera i utilitzar aquestes imatges per trobar i posicionar certes referències .

L'etapa de fotogrametria permet trobar i posicionar certes referències que es faran servir més endavant en el procés d'alineat del núvol de punts amb el món. Afegir aquesta càmera



al capçal (veure fig. 4) permet automatitzar de forma senzilla el procés d'extracció de fotografies per la fotogrametria ja que el joc que dona un robot i una taula rotatòria a l'hora de prendre vistes molt diferents necessàries pel càlcul és suficient per extreure bons resultats.



*Fig. 4. Capçal Sidio amb la càmera de fotogrametria.*

Per últim cal tenir en compte algunes consideracions sobre aquest capçal<sup>9</sup>. Per treballar amb normalitat, el capçal necessita que la làmpada del projector assoleixi i es mantingui a una temperatura adequada. Això implica que es necessita un temps d'escalfament del projector a l'encendre la màquina d'uns dos minuts i necessitarà també un temps de refredament amb els ventiladors encesos a l'hora d'apagar la màquina per evacuar la calor de forma correcta. Es recomana no tocar ni apropar-se massa al capçal ja que la temperatura de la superfície així com de l'aire calent que surt pels forats de ventilació pot ser elevada. Es recomana també evitar mirar a la llum del projector ja que emet rajos ultra-violetes i una llarga exposició podria malmetre la vista.

Es prohibeixen també les manipulacions dels elements interns del capçal ja que, a part de perdre la garantia, es podrien produir fuites o curtcircuits elèctrics, trencament o desajust d'elements importants pel funcionament de la mesura que portaria una pèrdua de la precisió de la captura de núvol de punts entre altres. Les úniques accions que es permeten fer un cop entregat el capçal són la neteja de les lents de la càmera, la neteja de la carcassa i els filtres, el recanvi de la bombeta del projector i l'ajust de l'iris de la càmera. D'aquests processos l'únic

---

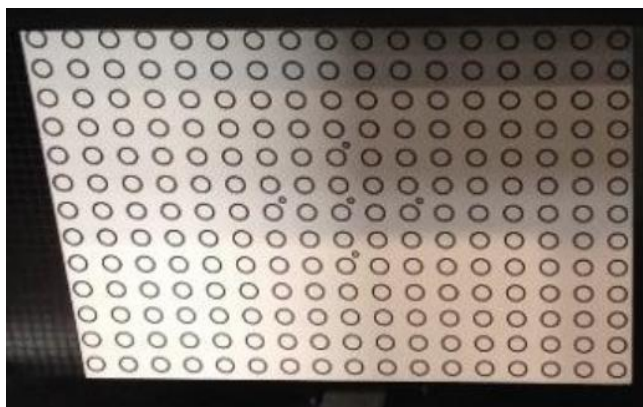
<sup>9</sup> Sidio Airus Maintenance Guide [9]

que podria esdevenir perillós és el recanvi de la bombeta del projector ja que la làmpada conté mercuri i en cas que aquesta es trenqués emetria uns vapors tòxics que obligarien a evacuar i ventilar l'habitació fins que els vapors haguessin desaparegut.

### 2.1.2. Placa de calibratge

Per assegurar que la qualitat de les mesures preses amb el Sidio es manté al llarg del temps, s'ha de dur a terme un procés de calibratge de l'escàner de forma periòdica. Per automatitzar aquest procés, es necessita comprovar que la lectura tant del núvol de punts com de les referències per part de l'escàner és correcta. Per a fer això, s'ha de cobrir tot l'espai que ocupa el volum que és capaç de llegir l'escàner. Com s'ha dit abans el volum de treball de l'escàner és de 550x390x200 mm així que per obtenir informació de tot l'espai s'utilitza una placa plana de dimensions 550x390 mm i es colla a sobre d'una guia que realitza un moviment rectilini per poder moure la placa a diverses profunditats.

La placa té un disseny molt específic (veure fig. 5). És una superfície blanca amb un patró d'una corona circular negra que es repeteix al llarg de 13 files i 17 columnes. Per a fer el calibratge de la càmera s'ha de col·locar el projector de forma perpendicular al punt central de la placa i tot el recorregut de la guia ha d'estar dins del volum de treball de l'escàner. Per això es necessita un espai en el que el robot pugui arribar sense complicacions i que no interfereixi en el treball normal del robot.



*Fig. 5. Foto de la placa de calibratge*

El procés de calibratge consisteix en digitalitzar la superfície de la placa a diverses profunditats, extreure les coordenades dels centres de les corones circulars i modificar els

paràmetres interns per minimitzar l'error trobat entre les mesures i un arxiu de calibratge que conté els centres de la placa amb precisions micromètriques.

## 2.2. Robot

Segons la norma ISO 8373, un robot és un manipulador multifuncional, reprogramable i automàtic amb tres o més graus de llibertat i que tant pot ser fix o mòbil. A l'hora d'escollir el robot que s'ha d'utilitzar per la cèl·lula és important saber exactament la tasca que ha de realitzar. En aquest cas el robot ha de ser capaç de situar un capçal que pesa uns 18 kg en les posicions i orientacions que siguin necessàries. Degut a les grans dimensions que poden tenir algunes de les peces que ha de mesurar el capçal també interessa que l'espai de treball del robot sigui el més gran possible.

Es vol poder ubicar el capçal en qualsevol posició i orientació de forma estacionària, així que la tasca que es realitzarà requereix que el robot sigui un robot de base fixa de com a mínim 6 graus de llibertat. Hi ha diverses companyies que ofereixen robots articulats de 6 graus de llibertat; Kuka, Fanuk, Stäubli... Per motius de compatibilitat amb el software del Sidio Airus només es consideraran en aquest projecte manipuladors de la casa ABB.

El manipulador que s'utilitzarà per aquesta aplicació serà una estructura de 6 eixos de la sèrie IRB, amb un disseny optimitzat per aconseguir grans prestacions tant de càrrega nominal com de velocitat. Segons les especificacions de producte, aquesta sèrie de robots compleixen tots amb la normativa vigent de seguretat de la maquinària (ISO 12100, ISO 13849-1 i EN 614-1 entre d'altres) i de requeriments de seguretat en ambient industrials (ISO 10218-1 ANSI/RIA R15.06 entre d'altres).

La família de robots ABB es caracteritzen per tenir resolucions molt petites en tots els eixos cosa que no només ofereix una repetibilitat molt elevada en els punts fins de la trajectòria sinó que en tots els cicles en que s'executi una determinat camí, el robot passarà pels mateixos punts del recorregut amb un marge menor als 0,15mm.

Tenint totes aquestes consideracions, s'han eliminat de la llista de possibles robots tots aquells amb una càrrega nominal inferior al pes del capçal més el de tot el cablejat i dressing, estimat en un total de 30 kg. El dressing és un conjunt de tubs, brides i elements de subjecció que serveix per fer arribar els cables d'alimentació i de transmissió de dades al capçal situat a l'extrem del robot evitant-hi possibles danys i assegurant una correcta comunicació durant el moviment de la unitat mecànica.

També s'han eliminat els robots que tenen càrregues nominals superiors als 150 kg ja que el preu i el consum elèctric creixen molt, són menys esvelts (cosa que podria dificultar un possible accés a una zona estreta) i el rang de treball no augmenta significativament. La llista dels robots<sup>10</sup> disponibles és la següent:

Model	IRB 4400-60	IRB 4600-45	IRB 4600-40	IRB 6620
Càrrega nominal	60 kg	45 kg	40 kg	150 kg
Rang de treball	1.96 m	2.05 m	2.55 m	2.2 m
Repetibilitat	0.3 mm	0.40 mm	0.40 mm	0.5 mm
Pes robot	1040 kg	425 kg	435 kg	880 kg
Soroll propagat	< 70dB	< 72 dB	< 72 dB	< 74 dB
Potència màxima	1.33 kW	1.43 kW	1.62 kW	2.8 kW
Preu	€€	€€	€€	€€€

*Taula 1. Resum dels models considerats per realitzar la tasca*

De les característiques esmentades en la taula 1, la més important a l'hora de triar el robot pel disseny de la cèl·lula en aquest cas en particular és el rang de moviments, és a dir, el valor màxim del radi que el robot és capaç d'assolir situant en un mateix pla els eixos 2, 3 i 5. En aquest aspecte, el millor model de robot dins de la gamma de robots esmentada és l'IRB 4600-40. Aquest model ofereix el rang de treball més elevat amb un pes, cost i consum molt inferior al 6620, el segon robot de la llista amb millors propietats.

L'espai de treball del robot escollit es detalla a la figura 6.

---

*10 Especificaciones de producto: IRB 4600 [10] i IRB 6620[11]*

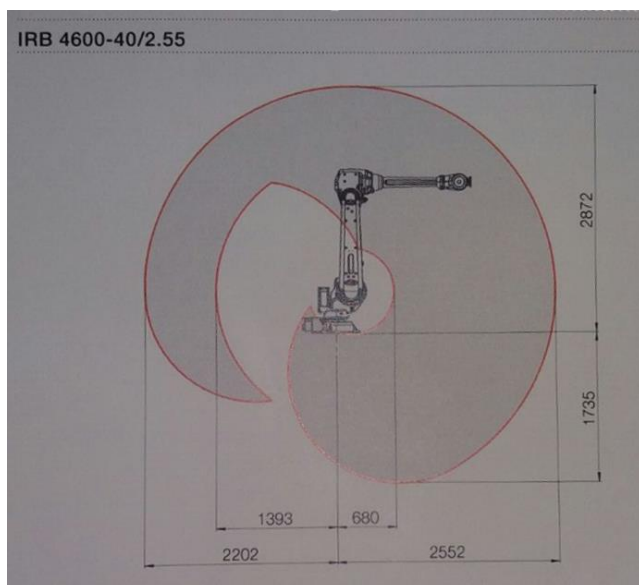


Fig. 6. Àrea de treball del robot IRB 4600-40. Font: IRB 4600. Product specifications

El soroll propagat està dins del rang que requereix la normativa. Altres consideracions a tenir és que la humitat relativa màxima que es recomana durant l'ús, el transport i l'emmagatzematge del robot és del 95%. El rang de temperatures a les que hauria de treballar el manipulador està entre 5 i 45°C. En cas que la temperatura sigui inferior als 10 °C el fabricant recomana fer una fase d'escalfament de la maquinària ja que a baixa temperatura hi ha risc que la viscositat de l'oli i el greix que porten els motors en redueixin el rendiment.

Per acabar, tots els robots actuals d'ABB<sup>11</sup> estan protegits seguint el grau de protecció IP67, que segons la normativa de graus de protecció CEI 60529 vol dir que està dissenyat per impedir l'entrada de pols sota qualsevol circumstància a l'interior dels mecanismes (la més alta) i l'entrada d'aigua en cas d'immersió completa a 1 metre durant 30 minuts (la màxima habitualment requerida en maquinària que no ha de treballar en condicions subaquàtiques). A part d'aquesta protecció, tots els robots també tenen de base una protecció "Foundry Plus 2" que estan preparats per operar en fàbriques en les que hi hagi alts forns o equips similars en les que s'hi poden trobar altes temperatures o cendres. Aquesta protecció extra afegeix un millor tancament, cobertes especials per cavitats, la possibilitat de neteja amb un flux d'aigua a alta pressió i una protecció especial a la corrosió en certes zones com la base de l'eina.

---

<sup>11</sup> Especificaciones de producto: IRB 4600 [10]

## 2.3. Controlador IRC5

El controlador IRC5<sup>12</sup> conté els elements electrònics necessaris per controlar el manipulador, els eixos addicionals i els equips perifèrics. Els elements que componen un sistema IRC5 és la cabina o armari, la unitat de programació i el Software industrial del RobotStudio. Aquests elements es situen dins d'un sol armari que aglutina de manera compacta tots els elements necessaris per al funcionament del robot.

### 2.3.1. Armari

L'armari és un prisma metàl·lic que té per la part frontal una porta que dona a l'interior i que pot segellar-se per oferir una protecció IP54 (resistent a la intrusió de la pols), un seguit de connectors d'entrada per rebre la corrent trifàsica i de sortida per portar la potència i el control al robot i dispositius extres. També té un panell de control en l'interruptor per apagar i encendre el controlador, un polsador d'emergència, el botó de motors en ON, un selector de mode, un port per connectar la unitat de programació i un port de servei per connectar-se amb l'ordinador.

El controlador té dos modes d'operació. Per canviar de mode d'operació s'ha de girar un selector que hi ha al panell de control de l'armari. El mode manual és el mode segur de moviment del robot ja que està dissenyat per tal que el robot només es pugui moure pressionant el polsador d'habilitació de la unitat de programació i ho fa a una velocitat reduïda i segura tant per l'operari com per la unitat mecànica. S'utilitza principalment en la fase de creació i verificació del programa i per tornar el robot a la posició inicial en cas de fallada o caiguda del sistema.

El mode automàtic és el mode normal de funcionament del robot. En aquest mode les velocitats a les que pot arribar el robot són molt elevades i l'operari no ha d'estar atent al polsador d'habilitació per fer-lo funcionar. Això implica que en mode automàtic ningú pot estar als voltants del robot ja que es posaria en risc. Per aquest motiu s'incorporen al robot certes

---

<sup>12</sup> Especificaciones de producto. Controlador IRC5 [12]

mesures de seguretat per assegurar que l'operari i les parts mòbils no puguin col·lidir i evitar així accidents.

Dins l'armari s'hi introdueix de manera compacta tots els elements necessaris pel funcionament del robot. Aquests elements són el mòdul d'accionament dels motors del robot on s'hi poden afegir fins a 3 eixos externs addicionals i el mòdul de control que inclou l'ordinador principal, les interfícies de comunicació de diversos busos de camp, diversos ports Ethernet i cert espai per col·locar equips addicionals depenent de l'aplicació del robot. Les diferents unitats estan dissenyades per ser accessibles sense haver de desconnectar ni treure cap altre element. La quantitat d'elements necessaris tant pel moviment del robot com per l'eix extern de la taula sumant tot l'espai necessari per les targetes de comunicació deixa relativament poc espai lliure dins l'armari.

Com l'equip addicional necessari per l'aplicació de l'escaneig és superior al volum restant de l'armari es necessitarà un altre habitacle en forma d'armari senzill on poder col·locar aquests elements (veure fig. 7). En aquest segon armari, col·locat a l'esquerra de la figura es pot veure que conté de dalt a baix un SAI<sup>13</sup> que s'utilitza per protegir els diferents equips contra errors elèctrics com sobretensions i proporciona energia a l'ordinador per apagar-se correctament i als ventiladors de l'escàner per refrigerar-lo un cop s'apaga el controlador. També té l'ordinador que serveix principalment com a interfície entre persona i robot, el hardware extern que requereix el capçal per funcionar i els elements de comunicació.




---

*13 Sistema d'alimentació ininterrompuda*



*Fig. 7. Armari del control del capçal (esquerra) i del controlador del robot (dreta)*

El controlador IRC5 inclou també una unitat de programació d'ABB, anomenada FlexPendant, que és un dispositiu que s'utilitza per la gestió i moviment del sistema robòtic. El mode automàtic permet comprovar valors de senyals i variables, executar el programa i servir com a interfície per rebre o introduir informació al robot. Si el controlador està en mode manual permet a més modificar programes, moure el manipulador mitjançant moviments lineals, reorientacions o moviments d'eixos, restablir còpies de seguretat etc. Aquesta unitat de programació serveix com a interfície entre l'operari i l'ordinador del controlador.

### 2.3.2. Ordinador i sistema operatiu

L'ordinador principal<sup>14</sup> del controlador IRC5 és un Intel Celeron 1.2 GHz amb 64 MB de DRAM que té suficient capacitat per calcular fins a 36 eixos (podria controlar com a màxim 3 robots i 3 eixos externs per robots) i fer operacions simultànies amb diversos canals Ethernet 10/100 Mbps. Aquest ordinador té compatibilitat per utilitzar diversos busos de camp diferents a la vegada (per exemple DeviceNet i EtherNet/IP) i té instal·lat el sistema operatiu del robot.

El sistema operatiu és el programa base de treball del controlador i realitza les funcions principals del robot. El sistema té d'entrada unes opcions de sèrie que poden permetre realitzar tasques senzilles però depenent de l'aplicació que se li vol donar al robot és necessari activar certes opcions per adaptar el sistema operatiu a la tasca que ha de realitzar el robot. En el cas de la cèl·lula actual el sistema operatiu ha d'incloure algunes opcions:

El sistema robòtic treballa amb moltes variables i senyals que apareixen pel simple fet d'afegir el capçal de mesura. Existeix un AddIn (recurs de software) anomenat **AIRUS** que, quan s'incorpora en el sistema operatiu, aquest genera diverses tasques, mòduls, rutines, senyals i variables bàsiques i predefinides que serveixen com a base per qualsevol cèl·lula d'inspecció. Les quatre tasques que genera són: una de principal en la que es comproven les condicions i s'executen les trajectòries, una que paral·lelament controla en quina posició està el robot (Home, manteniment, calibratge, punt d'escaneig, punt intermedi etc.), una tasca que gestiona

---

<sup>14</sup> IRC5. Descripción del sistema y entorno [13]

la comunicació amb el PC i una que gestiona els llums dels indicatius d'estat coneguts com a semàfors i el procés de reset del sistema.

Els programes d'un controlador IRC5 poden tenir diverses tasques, que a la vegada poden tenir diversos mòduls que poden tenir diverses rutines. Cada tasca disposa d'un únic punter de programa, és a dir, s'executa de manera seqüencial i res no s'executa fins que s'ha acabat la instrucció anterior. Si es vol que s'executin diversos codis a la vegada es necessiten més d'un punter de programa i per a fer això es requereix més d'una tasca. Per aquest motiu s'incorpora la opció de **multi-tasca** en el controlador del robot.

Degut a la gran varietat de sistemes que hi ha a la cèl·lula, hi ha un ordinador central que serveix com a nucli per comunicar-se amb el controlador i els dispositius externs del capçal. Aquest ordinador es pot utilitzar com a interfície entre el robot i l'usuari mitjançant una pantalla. Això permet rebre informació de l'estat del robot quan es desitgi, carregar diferents mòduls de trajectòries al controlador depenent del programa que es llenci i iniciar-les o aturar-les enmig del moviment. Per poder utilitzar l'ordinador com a interfície es requereix la opció de **PC Interface**.

Per acabar es vol limitar les zones en l'espai en les que el robot pot entrar a la indispensable pel correcte funcionament de la cèl·lula. Hi ha dues opcions que ofereixen aquestes característiques, la de zones món i la de SafeMove. La primera permet limitar les zones per codi dins del programa del robot i permet obtenir informació del TCP (punt de l'eina) del robot però les zones món queden definides en un mòdul de programa que podria esborrar-se o modificar-se fàcilment. La segona limita les zones a les que tota la unitat mecànica pot accedir per software utilitzant una eina del RobotStudio (el software industrial d'ABB) que només pot ser modificat des d'un usuari específic de seguretat. L'opció escollida per aquest sistema operatiu és la del **SafeMove** ja que ofereix més opcions de seguretat en la limitació de moviments i també permet afegir altres restriccions mecàniques al braç robòtic.

Aquest controlador s'ha dissenyat per tal d'oferir una seguretat màxima tant per a la màquina en sí com pels operaris i usuaris també seguint les normatives esmentades amb anterioritat. L'armari té una targeta d'entrades i sortides específica per a seguretat que incorporen tots els controladors i que està connectada als contactors, fet que permet aturar el robot ràpidament en el moment en que aparegui un error.

### 2.3.3. Targeta de seguretat

La targeta de seguretat<sup>15</sup> és el punt d'entrada on es connecten tots els elements desitjats mitjançant un sistema de doble canal de seguretat que es controla contínuament. En cas de fallada d'algun dels components, s'interromp l'alimentació dels motors, cosa que acciona els frens i fa aparèixer un registre a la unitat de programació informant del problema que s'ha detectat. Per poder tornar a funcionar s'han de restablir les condicions de treball i posar els motors en ON. Aquesta targeta es gestiona de forma electrònica enlloc de per software per assegurar el mínim retard possible dels senyals des de l'aparició de la fallada fins a l'aturada del robot i també per eliminar possibles errors que puguin aparèixer en el codi o en l'execució del programa.

La targeta de seguretats té 4 ports diferents d'entrada de senyals assignats a 4 aturades diferents que pot tenir el controlador. Aquestes aturades són la d'emergència, la general, la superior i l'automàtica.

A l'aturada d'emergència o Emergency Stop s'hi connecten tots els polsadors d'emergència (coneguts com bolets de seguretat) que incorpora la cèl·lula. Segons la normativa d'aturades d'emergència EN ISO 13850, la seva funció és la de prevenir situacions que puguin posar en perill persones, maquinària o treballs en curs i l'ha de poder activar qualsevol persona amb un únic moviment. Aquests polsadors s'han de situar per normativa a una alçada d'entre 1,2 i 1,5m per assegurar que està a l'abast de tothom. Per pujar la seguretat un cop s'ha pres el polsador és obligatori per normativa que es faci manualment per assegurar que un element de la cèl·lula pugui tornar a activar el robot fins que sigui totalment segura. Això s'aconsegueix mantenint el polsador ensorrat un cop s'ha activat la seguretat i per tornar-lo a la posició inicial s'ha de girar en el sentit de les agulles del rellotge uns 30 graus.

L'aturada general o General Stop s'utilitza principalment per aturar el funcionament del robot quan es troba alguna anomalia en els elements mòbils de la cèl·lula com seria un robot o un eix extern. Aquesta aturada pot saltar per exemple al detectar un parell massa fort en un motor, cosa que indicaria una col·lisió, quan la trajectòria del robot passa per un punt singular

---

<sup>15</sup> Especificaciones de producto. Controlador IRC5 [12]

o quan el robot intenta sortir de l'àrea de treball. També estan connectats al General Stop els interruptors que marquen el final de recorregut dels eixos del robot que se situen uns graus abans del fi mecànic i s'hi poden afegir més condicions d'aturada per software amb una opció especial anomenada SafeMove que s'explica més endavant.

L'aturada superior o Superior Stop és una aturada de seguretat que para el funcionament del robot amb la informació adquirida de sensors i equips perifèrics. Aquests dispositius són els encarregats d'assegurar que cap persona pugui entrar a la cèl·lula durant el procés de treball per evitar un possible accident. Aquests elements solen ser barreres d'infrarojos, sensors de tancament de les portes o sensors de proximitat o presència en certes zones de la cèl·lula.

L'aturada automàtica o Automatic Stop és una parada que funciona exactament igual que la Superior Stop però que només s'activa en cas que el robot estigui en mode automàtic. Això permet l'accés a la cèl·lula durant el procés de programació si el selector del controlador està en mode manual sense que caiguin les seguretats. A vegades entrar a la cèl·lula és necessari per tenir millor visibilitat de les posicions i el recorregut de la unitat mecànica. Els elements que s'hi acostumen a connectar són elements externs com en el cas del Superior Stop tot i que s'acostuma a connectar només el sensor de l'accés a la cèl·lula que s'utilitzarà en l'etapa de programació, habitualment el més proper a la unitat de programació. En la figura 8 es mostra un esquema general de la cadena de seguretats que incorpora el controlador.

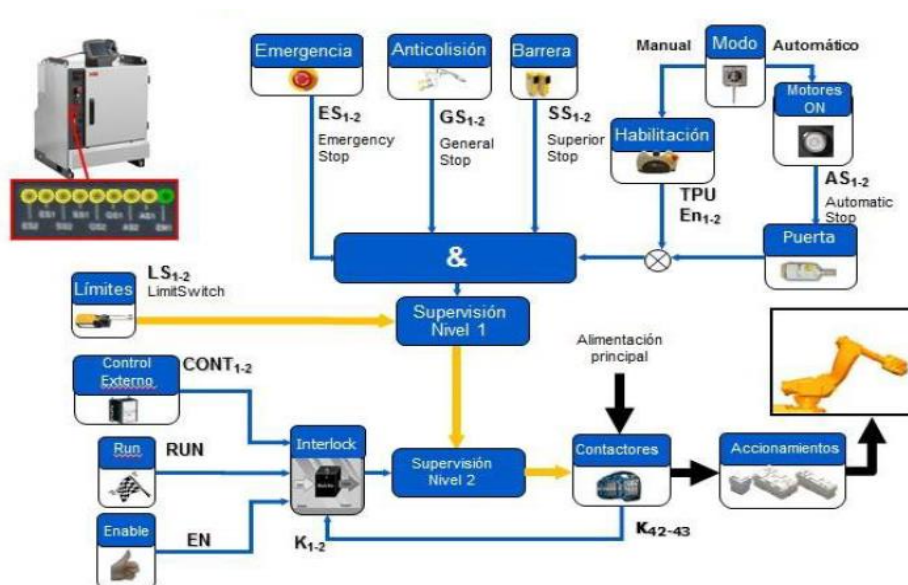


Fig. 8. Diagrama de la cadena de seguretats. Font: Curso básico IRC5. Transparencias

## 2.4. Taula rotatòria

La cèl·lula d'inspecció incorpora una taula en la que situar els utilitatges on col·locar les peces a inspeccionar. Per tal de poder assegurar una bona cobertura de totes les vistes de la peça s'afegeix un eix extern giratori en el centre de la taula per convertir-la en taula rotatòria. Afegir un grau de llibertat a la taula permet al robot arribar a vistes de la peça abans impossibles o accedir amb unes configuracions més còmodes pels eixos, cosa que permet assegurar una correcta inspecció de l'element a mesurar.

La taula es compon de dos elements principals, el motor que realitza el moviment de la taula i la superfície superior en la que s'ubiquen els diferents elements a mesurar. Per escollir el motor que s'ha d'utilitzar es té en consideració el pes o càrrega que ha de suportar, que en el cas del projecte actual aquest valor és de 600 kg més el pes que de la superfície de la taula, que ronda els 250 kg. Els models de motor<sup>16</sup> extern que es poden utilitzar en aquest projecte són el MTD 500, el MTD 750, el MID 500 i el MID 1000 i les seves característiques principals són les següents:

	MTD 500	MTD 750	MID 500	MID 1000
Càrrega màxima	600 kg	1000 kg	1300 kg	3300 kg
Parell màxim	650 Nm	900 Nm	1400 Nm	3800 Nm
Velocitat màxima de rotació	150 graus/s	150 graus/s	90 graus/s	90 graus/s
Temps en fer una volta	< 0.5 s	< 0.5 s	< 0.6s	< 0.9s

*Taula 2. Comparativa dels diferents motors disponibles per eixos externs*

El total de càrrega que ha de poder suportar el motor és de 850 kg així que pot descartar-se el MTD 500 perquè es pot malmetre l'eix extern amb el seu ús sota la càrrega màxima. Dels motors restants de la taula 2, el valor més interessant és el de velocitat màxima ja que el vector pes de la taula és paral·lel a l'eix del motor i per tant no es requereix un parell determinat per poder mantenir la peça inmovil. El model que ofereix un valor de velocitat més alt és el MTD 750.

---

<sup>16</sup> Product specification. Motor Units and Gear Units [14]

Un cop escollit el motor s'ha de triar les característiques de la superfície de la taula. Aquesta ha de garantir una gran planor al llarg de tota la superfície, fins i tot sota condicions de càrrega severes. La desviació màxima que accepta ABB en les superfícies de cèl·lules de metrologia és de 0.25 mm/m en condicions de càrrega respecte el pla que conté la circumferència definida en el forat central de la taula i de 0.05 mm/m sota condicions sense càrrega. Tot i que la taula arriba certificada pel proveïdor, es podria realitzar una segona verificació de la superfície mitjançant el capçal Sidio Airus si es cregués que s'ha perdut aquesta planor.

Deguda a la grandària d'algunes de les peces a mesurar i dels utilitatges que s'empraran per collar-les a la taula s'ha decidit modificar les dimensions de la superfície de la taula de les cèl·lules estandarditzades per tal d'ampliar-la. El motiu es que la peça amb majors dimensions que s'ha d'inspeccionar és d'aproximadament 2x1,5 m i la superfície de la taula estàndard és de 2x1,2 m.

Les limitacions que es tenen en compte a l'hora de realitzar el càlcul de les dimensions de la taula és que ha de poder contenir com a mínim la peça més gran i que es respectin, en la mesura que sigui possible, les proporcions de la taula estandarditzada. Per altra banda les longituds no poden créixer indefinidament perquè l'espai que hi ha dins de la cèl·lula i el rang de treball del robot són limitats. Si s'augmenta l'amplada de la taula el mínim i es manté la proporció de 5:3, el valor de les longituds es de 2,5 x 1,5 m.

Si es pretén deixar un espai de pas entre taula i robot per facilitar el moviment dels operaris, la distància entre el centre del robot i el centre de la taula és el radi de la base del robot més el metre<sup>17</sup> de passadís més la meitat de la longitud més gran. Aquest valor és de  $0.38+1+1.25 = 2.63$  m, valor superior al rang del robot. Si es vol que el robot pugui accedir a totes les vistes de la peça, com a mínim ha de poder arribar al centre de la taula. Si es redueix la longitud llarga en 200 mm, el valor queda dins del rang.

Per tota la superfície de la taula hi ha distribuïts forats amb rosca que serveixen per ancorar l'utilatge o l'estructura de suport de les peces que s'han de mesurar a la taula per assegurar que en cas de que es faci girar la taula no llisqui. Un altre element diferencial de la

---

*17 Construccions i arquitectura industrial. Lliçó 4: Distribució en planta [15]*

taula és que hi ha unes superfícies rectangulars amb un biaix en les que hi ha una imatge de fons negre amb 8 rodones blanques amb un patró determinat. Aquestes imatges s'anomenen codificats i se'n necessiten diversos a l'hora de realitzar la fotogrametria. En les taules de sèrie se'n posen 28 però degut a l'augment de superfície de la nova taula, aquesta en té 32. A part també es situen aleatòriament sobre la superfície de la taula uns petits adhesius circulars anomenats targets que serviran com a referència per ubicar posteriorment el núvol de punts a l'espai després del digitalitzat.

Per acabar, hi ha un últim element a tenir en compte a l'hora de dissenyar la taula ja que necessita d'un espai en el que situar una barra d'escalat. Normalment aquestes barres mesuren poc més d'un metre així que se situen a la vora d'un dels costats llargs de la taula. Per fer això s'han de col·locar dos sortints de l'estructura de la taula de ferro per poder assegurar que la barra no es mou respecte de la taula durant el procés de fotogrametria mitjançant un parell d'imants que se situen a la barra a la mateixa distància que la que hi ha entre els sortints.

## 2.5. Utiltatges

Per a realitzar les proves de metrologia, es necessita que les peces que es mesurin estiguin ben subjectes i fixes a l'estructura i per això es necessiten uns utiltatges que siguin robustos i que no es deformin amb facilitat. Aquests utiltatges també han d'assegurar que el posicionament de peces és repetitiu per assegurar que les captures que es puguin prendre des d'un punt de vista determinat observen la mateixa part de la peça amb la mínima desviació possible. Hi ha dues estratègies a seguir a l'hora de triar l'utiltatge que es vol fer servir.

La primera opció és fer servir utiltatges individuals on a la part superior hi ha la figura negativa de la superfície inferior de la peça. Un cop col·locada la peça es bloqueja amb alguns clamps situats estratègicament que exerceixen prou força com per fixar-la però no per deformar-la. La segona opció és un utiltatge compost per una estructura de barres de fibra de carboni en les que la peça només es recolza i es bloqueja en alguns punts determinats.

La primera opció ofereix facilitat, rapidesa i repetibilitat de les posicions al col·locar una nova peça ja que gràcies a la figura negativa s'aconsegueix una posició unívoca i un gran numero de punts en el que recolzar la peça, reduint una possible deformació. Aquesta estratègia, per contra, només serveix en els casos en que la peça tingui una única superfície que es vulgui mesurar ja que és impossible observar entitats de la part que queda amagada o s'hauria



d'utilitzar un altre utillatge per fer una segona inspecció de la cara inferior. A part, es requereix d'un utillatge específic per cada tipus de peça ja que és molt poc versàtil, cosa que incrementa el número d'utillatges necessaris si es volen realitzar inspeccions per tots els components de la carrosseria del camió. Aquest mètode es força costós tant en l'aspecte econòmic com en l'aspecte d'emmagatzematge i gestió.

La principal característica de la segona opció és la versatilitat que ofereix, permetent agrupar les diferents peces en famílies que tinguin dimensions i formes similars i utilitzar un únic utillatge per cada un d'aquests grups. Així, es pot aconseguir amb ben pocs dissenys utillatges vàlids per les prop de 200 peces que es volen mesurar. Aquest mètode té certs inconvenients respecte l'anterior ja que la repetibilitat de la col·locació queda empitjorada. Això obliga a reajustar el núvol de punts extret per l'escàner, fet que pot augmentar el temps de cicle de la inspecció. Per altra banda, aquest mètode permet inspeccionar la superfície inferior de la peça introduint el capçal dins de l'estructura per un dels espais buits o bé realitzar un segon programa d'inspecció amb la peça girada.

L'estratègia per la que s'ha optat és la de l'estructura de barres de fibra de carboni. A part de la seva gran versatilitat que implica un reduït nombre necessari d'utillatges, el fet que el material tingui un pes molt reduït ajuda a millorar la maniobrabilitat dels operaris. El disseny d'aquestes estructures no ha estat realitzat per ABB sinó que s'ha externalitzat a una empresa externa. A part de les barres de carboni, l'estructura té certes juntes per unir les diverses barres i un disseny pensat per suportar càrregues en moltes direccions. L'empresa que ha dissenyat els utillatges ha utilitzat figures triangulars en tots els dissenys per evitar les deformacions i per distribuir la càrrega en tota l'estructura.

La majoria d'utillatges s'han dissenyat per situar les peces a inspeccionar en la part superior excepte alguns casos de peces més grans que es situen en dos dels laterals, cosa que permet realitzar dues inspeccions en un sol programa. En la figura 9 es mostra la imatge d'una estructura per peces de dimensions reduïdes.





*Fig. 9. Exemple d'utilatge de fixació format per barres de fibra de carboni*

En el cas de la estructura de peces petites que es veu en la figura 9, es pot observar que l'estructura té unes rodes per ajudar en la seva mobilitat sobre la taula, esferes que serveixen com a juntes per unir diverses barres en un centre per crear l'estructura a base de triangles i en la part superior es poden observar uns clamps o pinces vermelles que serveixen per fixar la peça a l'estructura.

Tot el conjunt de base més placa de la taula rotatòria i la majoria dels utilatges on col·locar la peça deixa la superfície de la peça a mesurar a una alçada aproximada de 1,4 m. Per millorar l'accessibilitat del robot sobre aquesta superfície, aquest s'ha col·locat sobre una peana o columna que permet que el rang màxim de moviments del robot estigui a la distància idònia de l'espai on es posicionaran les peces. En aquest cas s'ha decidit que es col·locarà el robot sobre una columna de 1700 mm.

### 3. Seguretats

L'ús de robots introdueix riscos propis de la maquinària mòbil i del corrent elèctric de baixa tensió. Tot i que el número d'accidents laborals tendeix a ser menor<sup>18</sup> amb la introducció d'un robot en un procés productiu, el risc que aquest accident sigui més greu augmenta. Per això les mesures de seguretat de la cèl·lula han d'enfocar-se no sols en disminuir el nombre de possibles accidents sinó també la seva gravetat. La seguretat dels sistemes robotitzats tenen dues vessants, per una banda hi ha aquella intrínseca del robot o maquinària en sí que és responsabilitat del fabricant i per altra banda aquella que té a veure amb el disseny, implementació i ús del sistema.

Per començar, tots els elements que formen la cèl·lula han de complir amb els requisits de seguretat que imposa la normativa vigent. Aquests requisits estan destinats a reduir tant el risc a persones com augmentar la durabilitat de l'element en sí. Per això es consideren principalment les normes EN ISO 10218-1 i 10218-2 que són l'estàndard internacional de requeriments de seguretat i avaluació de riscos de robots industrials. En aquesta norma hi ha indicacions de caràcter general sobre com ha de ser un sistema robotitzant tenint en compte aspectes mecànics, elèctrics, ergonòmics i de control. La norma que es segueix principalment per la resta d'elements és la 12100 que és la norma de seguretat de les màquines, on es troben indicacions similars però de caràcter més general.

A l'hora de lliurar la cèl·lula, el cap del projecte redacta una declaració UE de conformitat en la que assegura que es compleixen les principals directives europees que ha de complir. Les exigències de seguretat i salut venen marcades per les directives 2006/42/CE relativa a màquines, la 2014/35/UE relativa al material elèctric de baixa tensió i la 2014/30/UE relativa a la compatibilitat electromagnètica.

Degut al procés al que es sotmet el robot en la cèl·lula apareixen nous riscos que s'han d'atenuar o eliminar. En aquest cas específic hi ha el risc que hi hagi una col·lisió o atrapament operari-robot i, que després d'hores d'utilització, els ulls dels operaris es vegin afectats per culpa dels rajos emesos pel projector del capçal.

---

<sup>18</sup> *Guía técnica de seguridad en robótica [16]*

Per eliminar els riscos esmentats anteriorment s'han d'introduir en la cèl·lula certes mesures de seguretat per reduir la possibilitat que passin accidents i la seva gravetat. En la normativa europea UNE-EN 775 hi ha una estratègia de treball per tal de seleccionar els elements de seguretat. El fet que es compleixin totes les normatives de seguretat no garanteix que a la cèl·lula no pugui haver accidents greus. A l'hora de fer el disseny de la cèl·lula es recomana fer una identificació de tots els elements de risc que es poden generar durant totes les fases de treball, incloent el muntatge, la programació, el manteniment i l'ús normal. Després es fa un càlcul del risc de la cèl·lula calculant les probabilitats que es produeixi cada una de les situacions de risc i ponderant el valor amb el dany que pot causar.

### 3.1. Seguretat en els robots ABB

El propi robot té certes mesures de seguretat incorporades de sèrie<sup>19</sup>. Aquestes mesures van principalment encaminades a la protecció de l'usuari tot i que hi ha algunes que serveixen per evitar també danys en la unitat mecànica. Aquestes mesures de seguretat són:

**Frens dels motors.** Els frens dels robots d'ABB funcionen amb un electroimant que manté els frens inactius quan rep tensió i que els activa quan deixa de rebre'n. Això permet aturar el robot quan hi ha alguna fallada com podria ser una pèrdua de tensió, una aturada d'emergència que talla l'alimentació o similar. Si es volen desactivar els frens, primer s'ha d'assegurar que arriba tensió a l'electroimant (no es pot fer amb el robot apagat) i posar els motors en ON, fent que siguin els motors els que aguantin la posició del robot o deshabilitant els frens manualment, cosa que no es recomana fer excepte en comptades ocasions.

**Polsadors d'emergència.** Habitualment els robots tenen dos polsadors d'emergència, un en l'armari del controlador i un en la unitat de programació, tot i que es poden afegir la quantitat desitjada connectant-los en sèrie a la targeta de seguretats del controlador, en el port del Emergency Stop com en el cas d'aquesta cèl·lula que n'incorpora 2 extra. Un cop es prem un dels polsadors (veure fig. 10), els motors deixen de rebre tensió i en conseqüència s'activen els frens mecànics de tots els eixos del robot, incloent els eixos externs. Si es vol tornar a posar la cèl·lula en condicions de treball s'han de pujar tots els polsadors per restablir el canal de

---

<sup>19</sup> Especificaciones de producto: IRB 4600 [10]

seguretat i activar els motors per tal de rebre-hi tensió i poder desbloquejar els frens. Una aturada d'emergència obliga a més a portar el robot a les condicions inicials, impedit així que segueixi el programa per on estava abans que saltés la seguretat.



*Fig. 10. Polsador d'emergència ABB.*

**Supervisió del moviment.** És una mesura de seguretat que inclouen tots els robots i que l'obliguen a aturar-se quan hi ha un augment inesperat del parell en un o més motors. Aquest augment acostuma a significar que hi ha hagut alguna col·lisió entre la unitat mecànica i un element extern que podria ser tant a causa d'un xoc contra un obstacle com que una persona s'hagi quedat atrapada entre el robot i una part fixa. Quan salta la supervisió cau la tensió dels motors i s'activen els frens. A diferència de l'aturada d'emergència, en aquest cas sí que es podria seguir el programa en el punt on s'ha produït la supervisió un cop eliminada la causa de la col·lisió.

**Limitació de la velocitat màxima.** Els robots d'ABB tenen limitada la velocitat màxima a la que es pot moure el TCP durant el mode manual per assegurar que, en cas de xoc, l'energia que té el robot sigui molt baixa i per tant la gravetat del possible accident que es pugui produir sigui molt petita. Per normativa la velocitat màxima a la que pot anar un robot en manual és de 300 mm/s tot i que pels robots ABB aquest valor està fixat en 250.

**Polsador d'habilitació.** La unitat de programació té en un dels laterals un polsador d'home mort de tres posicions. Aquestes tres posicions són una que manté els motors activats i dues que baixen els relés i els deshabiliten. Durant el mode manual s'ha de mantenir accionat el polsador per tal de tenir els motors activats, ja sigui durant l'execució d'un programa o fent un moviment amb el joystick de la unitat de programació. En cas que s'excedeixi la força que es fa en el polsador també salten els relés ja que podria ser degut a un atrapament de la mà amb el robot.

## 3.2. Elements de seguretat físics

Per evitar que una persona pugui entrar de forma voluntària o involuntària dins la cèl·lula i aquesta segueixi treballant s'han d'afegir elements externs de seguretat que o bé impedeixin l'entrada de manera física a la persona o bé aturi el robot en cas que la persona entri a la cèl·lula.

L'element predominant són les barreres que impedeixen passar físicament a dins de la cèl·lula. La protecció que ofereix el vallat es basa en dimensionar correctament l'alçada i distància entre barrera i màquina per assegurar que des de fora no es pugui accedir a cap punt perillós definides en les normatives UNE EN 292, 294, 811 i 953. En aquests documents s'explica com determinar l'alçada que ha de tenir la barrera, el marge inferior que pot tenir, la distància que ha d'haver entre ella i la màquina i fins i tot la grandària màxima que poden tenir les reixes. En el cas de la cèl·lula actual les barreres són plaques sòlides opaques de 3m d'alçada que impedeixen que una persona posi cap part del cos tant per sobre com per sota com entremig. A part tenir aquesta configuració de barrera sòlida també evita que el feix de llum que emet el projector del Sidio Airus pugui arribar als operaris, disminuint així el risc de ceguera que pot aparèixer després d'una exposició prolongada al llarg del temps.

Aquestes barreres han de deixar suficient espai de marge dins de la cèl·lula perquè el robot no col·lideixi prop de l'àrea de treball (en aquest cas l'àrea de la taula on es fan les inspeccions), que un operari pugui passar per qualsevol via per arribar a la sortida (s'ha de deixar 1 metre de passadís) i que es tingui prou espai per les tasques de programació, manteniment dels aparells i càrrega-descàrrega.

Durant la fase de programació, manteniment, calibratge etc. s'acostuma a necessitar la presència d'una persona dins la cèl·lula, cosa que obliga a oferir una manera d'entrar i sortir a través de les barreres físiques instal·lades i també a eliminar perills que puguin aparèixer a l'entrar una persona. Per a poder accedir hi ha diverses opcions que es poden considerar:

L'opció més habitual és la creació d'una porta d'accés amb un sensor de tancament i que opcionalment pot tenir incorporat un interruptor de seguretat amb enclavament electromagnètic. Aquest dispositiu té un electroimant que bloqueja el mànec quan està en posició de seguretat i només permet desbloquejar-se si es polsa un botó que baixa les seguretats i para el robot. Com hi ha la possibilitat que algú quedi atrapat a dins, s'afegeix des de dins un

element mecànic que a l'activar-se fa saltar l'aturada d'emergència i obre la porta encara que estigui la posició de seguretat activada des de fora.

Una altra opció és la d'introduir un espai en que no hi hagi barreres físiques. Això pot fer-se incorporant barreres o cortines fotoelèctriques. Aquests són dispositius que tenen un conjunt d'emissors que emeten unes radiacions òptiques de llum infraroja i els respectius receptors situats entre els punts que es volen controlar. Quan un element talla un dels feixos de llum de la barrera, el circuit de seguretat al que està assignada cau i el robot s'atura en sec. En aquest cas s'ha de dissenyar un procés de rearme que asseguri que un cop s'ha travessat la barrera i tots els receptors rebin el seu feix de llum el robot no pugui començar a funcionar de cop i volta.

També hi ha l'opció d'introduir de manera complementària uns escàners làser de proximitat. Segons la normativa UNE EN 954, aquests dispositius tenen una categoria 3 de seguretat així que no poden substituir les barreres fotoelèctriques que són de categoria màxima. Tot i això si la cèl·lula només considerés els dispositius de tancament com la porta o les barreres seria possible que, fent tot el procés de rearme de la cèl·lula, algú quedi dins ja que no hi ha un control de l'interior. Aquests dispositius són uns sistemes que emeten feixos de llum infraroja en totes les direccions d'un pla i són capaços de trobar la distància que recorre aquest feix abans d'arribar a un element opac. Poden ser programats per assignar-los una zona de protecció que aturi la màquina en cas que s'hi trobi algun element i una zona de preavis que pot tractar-se per reduir la velocitat del robot.

Per aquesta cèl·lula també cal considerar que es necessita un espai d'entrada i sortida per introduir les peces, en aquest espai no només han de poder passar els utilitatges i les peces a mesurar sino que també ha de poder entrar la màquina de transport i l'operari que ha de fixar-la. Aquest espai ha de ser com a mínim de 2 m donant un marge al toro elevador per poder maniobrar. Per assegurar que ningú pugui entrar a la cèl·lula a través d'aquest espai s'ha de col·locar una barrera fotoelèctrica.

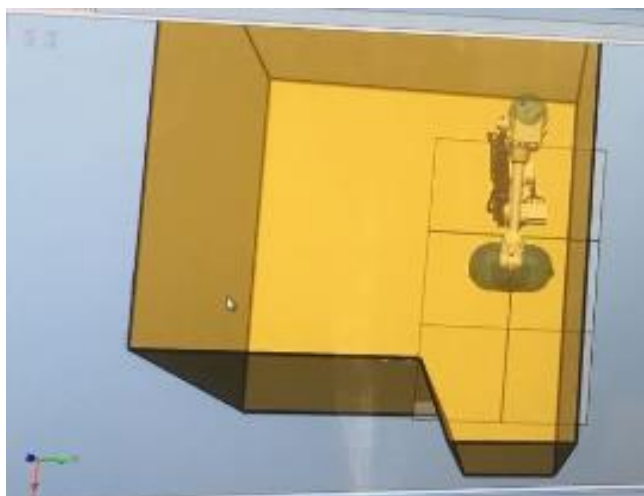
### 3.3. SafeMove

Com s'ha explicat anteriorment, el SafeMove és una opció addicional que es pot incorporar al sistema operatiu del robot i que permet afegir certes característiques de seguretat extra al robot. Aquest es connecta a la targeta de seguretats del SafeMove DSQC 647 on es fan

també totes les connexions amb elements externs del robot que es necessitin. Per introduir canvis en el sistema de SafeMove s'ha de connectar un ordinador al port de servei del robot, entrar a l'opció de SafeMove del RobotStudio i fer allà els canvis desitjats. Per introduir aquests canvis s'ha d'iniciar sessió en el sistema operatiu del robot amb l'usuari de seguretat i sincronitzar l'estació del RobotStudio amb la real. Cal advertir que la taula rotatòria no es pot connectar a la targeta del SafeMove i per tant no es poden realitzar les accions que sí que es poden fer amb el robot. Les restriccions que s'han introduït al robot són les següents:

**Limitar eixos.** Tot i que el robot té uns interruptors que no permeten que s'arribi al tope mecànic hi ha alguns casos que interessa limitar el valor que poden adquirir. En aquest cas s'ha decidit reduir els límits de l'eix 4 de  $[-400,400]$  a  $[-200,200]$  per assegurar que el dressing del robot no quedi massa tibant o faci un mal angle i evitar així que es pugui fer malbé algun dels cables que van per dins.

**Limitar zones de moviment.** Aquesta acció consisteix en introduir manualment o de forma aproximada en l'estació virtual els punts que es vol que limitin la zona en la que el robot es pot moure (veure fig 11). Es pot afegir també volums addicionals de control que pel SafeMove passen a ser part del robot i que si surten de la zona de moviment també faran que el robot s'aturi. En aquest cas s'ha afegit un volum addicional que envolta tot el capçal i un petit per una part del dressing enganxada sobre l'eix 3 i que sobresurt una mica per la part de darrere del robot. Si la superfície que forma el robot contacta els volums addicionals col·lideix amb la superfície que marca els límits de la zona de moviment el robot s'atura i per tornar-lo a activar s'ha de passar a manual i moure'l amb el joystick perquè torni a estar dins de la zona.



*Fig. 11. Límit de l'àrea de treball utilitzant SafeMove*



El SafeMove també permet limitar la velocitat màxima del TCP en automàtic. En mode manual els robots d'ABB tenen la velocitat limitada a 250 mm/s però no hi ha més límit que el que físicament i mecànica pugui aconseguir en mode automàtic. L'opció del SafeMove permet limitar la velocitat màxima del TCP tant lineal com reorientació i també la velocitat màxima de cada un dels eixos sigui quin sigui el moviment que estigui realitzant. Això s'utilitza en aquesta cèl·lula quan s'hi introdueixen escàners làser, on es pot definir una zona de seguretat en la que si s'hi troba un obstacle en una zona de preavís el robot es mogui a la velocitat definida pel mode manual però no s'aturi.

A part d'aquestes accions esmentades el robot té activades també una comprovació periòdica que la calibratge del robot és correcta. Tot i que el robot incorpori aquestes mesures de seguretat, no són suficients per tal que el seu envoltant sigui una zona segura. La millor manera de reduir el risc d'accident al mínim és el de garantir que el robot no funcionarà en cas que una persona estigui dins de la cèl·lula. La forma de garantir aquesta no presència és la d'instal·lar certs elements que impedeixin l'entrada del treballador dins de la cèl·lula o que totes les unitats mecàniques s'aturin en cas que hi entri.

### 3.4. Sistema RFID d'identificació.

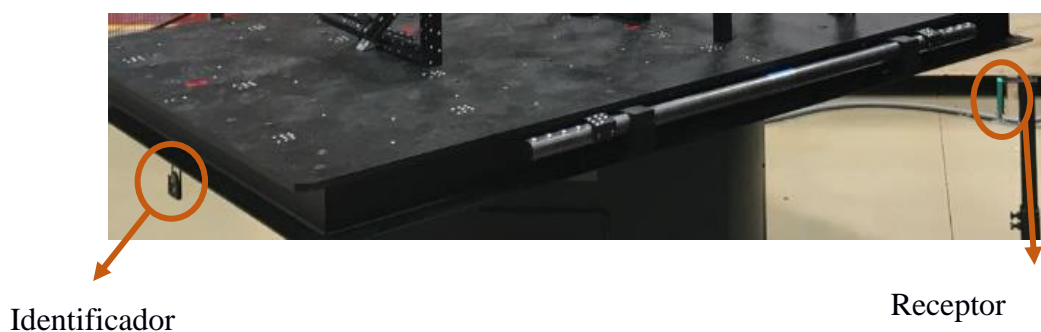
El sistema RFID és un sistema de seguretat<sup>20</sup> que permet reduir errors humans que puguin aparèixer durant el transcurs de l'activitat productiva. Aquest sistema consisteix en realitzar una doble comprovació, per software i per hardware, que el programa que es requereix per executar coincideixi amb l'assignat a la peça i utilitatge que hi ha a la taula rotatòria.

El sistema està format per un receptor que se situa a un punt fix de la cèl·lula i un identificador que se situa a la taula rotatòria (veure fig. 12). El receptor emet un petit camp de radiofreqüència que l'emissor capta si se situa a una posició molt propera. Quan l'emissor capta aquest camp, es genera un petit corrent elèctric en l'emissor que alimenta els circuits interns i li permet enviar les dades que té guardades. Aquestes dades seran captades pel receptor i transmeses al controlador del robot.

---

<sup>20</sup> *FlexInspect User Manual* [8]





*Fig. 12. Foto sistema RFID*

Aquest identificador de radiofreqüència és un dispositiu passiu, és a dir, que requereixen de l'alimentació que reben de l'equip receptor per funcionar. L'avantatge principal d'utilitzar aquest sistema és que no requereix d'una font d'alimentació interna com podrien ser unes piles que s'hagin d'anar comprovant i canviant periòdicament ni un cablejat que se situï sobre la taula rotatòria en cas que es requereís l'alimentació de forma externa. Els emissors tenen una forma similar a un disc de hoquei, són relativament fàcils de programar i són capaços de reprogramar-se per assignar un programa diferent en cas que una peça es deixi d'inspeccionar o en cas que s'hagi corromput la memòria.

A l'hora de carregar una peça amb l'utillatge corresponent, l'operari s'ha d'assegurar que també es canvia l'identificador i que el que es col·loca és el que correspon a la peça que es vol mesurar. A l'hora d'executar el programa, el controlador envia una senyal per demanar la lectura de l'identificador, i comprova que la senyal rebuda de l'emissor correspon al número de la peça que té assignada el programa. Si els valors coincideixen el robot comença el procés d'inspecció i en cas de no coincidir salta un error que ho indica. Així s'evita que l'operari executi un programa amb una trajectòria errònia que podria fer col·lidir el robot amb la peça o l'utillatge.

### 3.5. Altres sistemes i mesures de seguretat

A part de tots els sistemes que incorpora la cèl·lula per assegurar l'absència de personal durant el treball del robot, també s'incorporen altres dispositius que poden ajudar en el correcte funcionament de la cèl·lula per part dels operaris i que permeten reduir els riscos d'accidents. Aquests elements addicionals són tots aquells que pot tenir la cèl·lula per donar informació a l'operari.

El sistema principal que recull tota la informació de la cèl·lula és el programa del Sidio Inspector que es pot veure a la pantalla de l'ordinador. Mitjançant aquest software es comproven les diverses senyals d'estatus tant del robot com de l'escàner, la càmera de fotogrametria i el software addicional necessari per treballar i, amb la informació rebuda, ensenya per pantalla els diferents conceptes amb l'estat que tenen (veure fig. 13). Quan tots els estats són correctes es canvia la pantalla del Sidio i el robot pot començar a realitzar inspeccions.






Fig. 13. Pantalla d'estats amb tots els elements funcionant correctament

Tot i que aquest dispositiu és el que conté més informació, per la normativa d'interfície de seguretats recollida en el document UNE-EN 60445:2017 obliga a incorporar altres elements que mostrin en tot moment l'estat en que es troba la cèl·lula.




El més important d'aquests elements és l'anomenat llums d'estat. Acostuma a ser una pila cilíndrica amb llums de diferents colors i que fins i tot pot incorporar una alarma auditiva. En aquesta cèl·lula s'han col·locat 3 llums a la part superior de la barrera que indiquen l'estat

global de la cèl·lula. Aquestes llums poden estar enceses, apagades o emetent llum en intervals periòdics. El control de les llums es fa mitjançant una tasca semi-estàtica que incorpora el controlador i que es crea automàticament al generar el sistema operatiu amb l'opció del Sidio Airus. La informació de l'estat que proporcionen aquests llums és la següent:

Color	Estat	Descripció
Vermell 	Encès	Parada d'emergència
	Intermitent	Parada superior o general deguda a caiguda de barrera, porta o escàner. Robot en mode manual
	Apagat	Seguretats OK
Taronja 	Encès	Cicle en auto Robot pausat
	Intermitent	Error en la comunicació amb el PC
	Apagat	Sense pausa
Verd 	Encès	Mode automàtic Seguretats OK Programa iniciat
	Intermitent	Condicions correctes per iniciar el programa
	Apagat	Seguretats caigudes Robot en mode Manual

*Taula 4. Informació de l'estat proveïda pel semafor de la cèl·lula*

L'indicador anterior és molt general i no permet tampoc realitzar cap acció sobre la cèl·lula. Per això s'incorporen 2 botoneres addicionals en la cèl·lula per controlar les seguretats. Aquestes dues botoneres estan col·locades una al costat de la porta i l'altra al costat de la barrera fotoelèctrica. Aquests botons i les llums que emeten també estan controlats per la tasca semi-estàtica de seguretat del robot. Al costat de la porta hi ha un panell amb un polsador d'emergència i 3 botons que tenen les següents funcions:

Color	Estat	Descripció
Blanc 	Encès	Permís per obrir la porta.
	Intermitent	Permís per obrir la porta demanat però no concedit
	Apagat	Accés no permès i no demanat
	Acció al polsar	Demana permís per obrir la porta. Si la llum està intermitent cancel·la el permís ja demanat.
Blau 	Encès	Seguretat resetejada. Porta bloquejada
	Intermitent	Seguretat caiguda.
	Apagat	Robot en mode manual, no cal resetejar seguretat perquè està connectada a l'AS
	Acció	Si la porta està ben tancada la bloqueja i es reseteja la seguretat.
Verd 	Encès	Programa iniciat
	Intermitent	Programa aturat
	Apagat	Alguna seguretat incorrecta o robot en manual
	Acció	Motors ON + inici de programa

*Taula 5. Informació accions que es poden realitzar en la botonera*

Al costat de les barreres fotoelèctriques hi ha un panell molt similar que té els mateixos botons. En aquest cas hi ha un primer botó blau a dins de la cèl·lula que s'ha de polsar que activa durant 10 segons la llum intermitent al botó del panell exterior. Si es prem el botó abans del termini les seguretats queden activades i, en cas contrari, cal tornar a prémer el botó a l'interior per activar el de fora. Aquest procés és així per evitar que algú connecti les seguretats sense comprovar si hi ha una persona dins de la cèl·lula.

Un cop muntada tota la cèl·lula robòtica hi ha algunes mesures addicionals que es poden prendre per augmentar el nivell de seguretat a l'hora de treballar. Es recomana, si és possible, que durant la fase de programació hi hagi dos operaris i que un d'ells estigui observant i atent per accionar l'aturada d'emergència en cas de perill. També és important que a l'hora de provar un programa que té una trajectòria nova aquest es provi progressivament, pas a pas i a una velocitat reduïda per evitar un moviment brusc que pugui danyar la unitat mecànica o elements de la cèl·lula. Després es pot executar de manera contínua i a una velocitat més elevada fins arribar a la velocitat de treball. Una altra recomanació que es fa és la de delimitar amb marques

al terra la zona màxima a la que el robot pot arribar per, en cas que s'hagi de fer treballs dins de la cèl·lula, es procuri evitar el màxim possible la zona d'acció del robot. En aquest cas les marques es col·locaran en la base del prisma definit en l'estació virtual del SafeMove.

Segons un estudi del ministeri d'Indústria d'Espanya<sup>21</sup> dels accidents que s'han produït durant l'última dècada en la indústria, les causes més freqüents d'accidents són el fet de manejar càrregues elevades, la falta de protecció dels llocs de treball, la poca prevenció de l'operari i la temporalitat/inexperiència. Per això és important dissenyar un bon sistema per moure les càrregues, protegir el lloc de treball, prendre totes les precaucions possibles i formar correctament els operaris.

Durant les tasques de posada en marxa de la cèl·lula i manteniment es recomana al personal que hi treballa que desconnectin tots els equips de les fonts d'alimentació abans de posar-se a treballar i senyalitzar d'alguna manera que s'està treballant perquè alguna altra persona no pugui encendre els equips posant la primera en perill. Si hi ha equips que permeten el bloqueig mitjançant per exemple una clau es recomana fer-ho i endur-se la clau per assegurar que no es connecta de cap manera. S'ha d'anar molt amb compte amb el corrent elèctric ja que és una causa important d'accidents en la indústria. Segons la normativa<sup>22</sup> els efectes que produeix el corrent elèctric sobre els éssers humans són els següents:

Intensitat A	Efectes en el cos humà
0.5 mA	Sensació dèbil, formigueig
10 mA	Contracció muscular
30 mA	Llindar de paràlisi respiratòria
75 mA	Llindar de fibril·lació cardíaca
1 A	Aturada cardíaca

*Taula 6. Diferents nivells d'intensitat i la seva repercussió sobre la salut*

En cas que es requereixi tensió per a realitzar les tasques de manteniment que s'han de fer, per exemple per comprovar si els cables estan bé o si certes senyals s'envien correctament, és indispensable que es prenguin totes les mesures possibles per evitar enrampaments i curtcircuits. Per treballar en els circuits elèctrics (es recomana encara que el sistema estigui

<sup>21</sup> *Sistemas de automatización y robótica para las pymes españolas.*[17]

<sup>22</sup> *Seguridad en las instalaciones eléctricas* [18]

desconnectat) l'operari s'ha d'equipar amb botes de sola de goma, guants i pantalons aïllants i utilitzar eines en bon estat.

La darrera mesura a prendre és la d'equipar<sup>23</sup> i formar correctament tot el personal que ha de treballar en la cèl·lula robòtica. Aquesta formació ha d'incloure el funcionament dels diferents elements de la cèl·lula (unitat de programació, controlador, robot, ordinador etc.) el coneixement de totes les vies per sortir de la cèl·lula en cas de moviment del robot, la totalitat del programa que s'està executant, les condicions de treball i fer especial èmfasi en els elements de seguretat. També és necessari que els operaris tinguin equip propi que els pugui protegir davant certs riscos. Botes amb punteres metàl·liques, cascos i guants en cas que hagin de manipular càrregues importants per evitar danys greus en cas que caigui alguna cosa de pes sobre ells com podrien ser les peces a mesurar.

Per assegurar que una persona sense els coneixements no està fent treballar la cèl·lula es pot programar el controlador o l'ordinador perquè requereixi un codi de seguretat a l'encendre's que només coneguin els operaris qualificats. Els operaris de manteniment no cal que tinguin aquest codi ja que podran donar tensió als circuits per fer funcionar tots els elements de la cèl·lula però no podran executar el programa. Per últim, és important que les cèl·lules estiguin sempre en bones condicions. Això significa que s'ha d'evitar de posar obstacles que puguin dificultar o impedir el pas a cap persona, mantenir el terra net d'aigua, taques d'oli o altres residus que podrien fer reliscar i assegurar que els equips, sobretot els sensors òptics i els ventiladors es netegen periòdicament per assegurar un correcte funcionament.

---

*23 Manual del operador. Información general de seguridad [19]*

## 4. Disseny de la cèl·lula

Després de decidir tots els diferents elements que ha d'incorporar la cèl·lula i les característiques que ha de tenir s'ha de dissenyar la seva distribució en planta. Aquest és un pas previ al disseny d'un entorn virtual a RobotStudio que s'utilitzarà posteriorment en les tasques de programació i verificació de trajectòries. En resum aquests són:

Robot IRB 4600-40/2.55 amb un capçal Sidio Airus.

2 armaris (controlador i processament Sidio).

Taula rotatòria de 2300x1500 mm amb motor MTD 750.

Possibilitat d'afegir en un futur una segona taula.

El primer pas és planificar la distribució dels components de la cèl·lula. L'espai disponible a la nau de destí és de 10 x 6 m, amb passadís per un dels laterals llargs. Degut a que es vol que en el futur un únic robot pugui servir a dues taules diferents, s'ha decidit dissenyar una cèl·lula simètrica amb el robot ubicat en el centre de la cèl·lula. Com el controlador i les pantalles de l'ordinador han de ser accessibles pels operaris, aquests elements han d'estar situats fora de la cèl·lula però per la part que dona al passadís. Per tal d'escollir la distribució dels elements s'ha representat els diferents sistemes en un Software de disseny assistit per ordinador amb les corresponents dimensions i rang d'acció.

El rang d'acció del robot és de 2,55m tot i que gràcies a les dimensions del capçal aquest valor augmenta fins als 2,9m. Així doncs, la distància màxima que pot haver entre el robot i el centre de la taula rotatòria té aquest valor encara que per motius d'accessibilitat els dos sistemes han d'estar més propers. El límit inferior que marca aquesta distància és el que es troba utilitzant la normativa<sup>24</sup> de seguretats. S'ha de deixar 1 metre de distància entre el robot i la taula en la seva posició més desfavorable per tal que un operari pugui passar per entremig sense problemes.

---

*24 Construccions i arquitectura industrial. Lliçó 4: Distribució en planta [15]*





L'espai d'ús exclusiu de la taula mostra la superfície total ocupa si es rota, així es pot assegurar que cap configuració de la taula redueix la distància del passadís a menys d'1 metre. Per acabar, el robot té el rang d'acció definit per la circumferència gris tot i que, com s'ha explicat en l'apartat 3.3, es pot restringir la zona de moviments per software i limitar-los a les zones que no formen part del passadís.

Un cop validada la distribució de la cèl·lula el següent pas és traslladar el disseny a l'entorn virtual de RobotStudio. Aquest software permet crear una estació des de zero a partir dels diferents elements que componen el sistema. Tots els elements mecànics que es fan servir a la cèl·lula tenen el seu corresponent model en la biblioteca interna d'ABB (veure fig. 15). En aquest cas s'ha d'afegir una taula MTD i un robot 4600.



Fig 15. Imatge dels dos elements mecànics de la cèl·lula en la biblioteca d'ABB

Quan s'incorporen aquests elements s'han d'ajustar les característiques del model. En el cas del robot és un 4600-40/2.55 i el cas del motor extern és un MTD 750. Les ubicacions d'aquests elements es poden fixar per coordenades del centre. Per acabar s'ha d'importar d'una llibreria d'equipament el capçal Sidio i d'una llibreria d'usuari o un model tridimensional la superfície de la taula rotatòria. El model tridimensional amb aquests únics 4 elements ja permet la realització de diverses tasques en projectes futurs com són la programació i verificació de trajectòries que haurà de seguir el robot per extreure el núvol de punts de les peces a inspeccionar.

Per millorar la presentació del projecte al client i observar possibles errors de disseny s'ha optat per millorar el model bàsic incorporant altres elements físics que donin una millor aproximació visual del resultat i d'alguns elements a escollir. Així doncs s'han introduït més elements de les llibreries com dos armaris de controlador, una columna de 1700 mm pel robot,

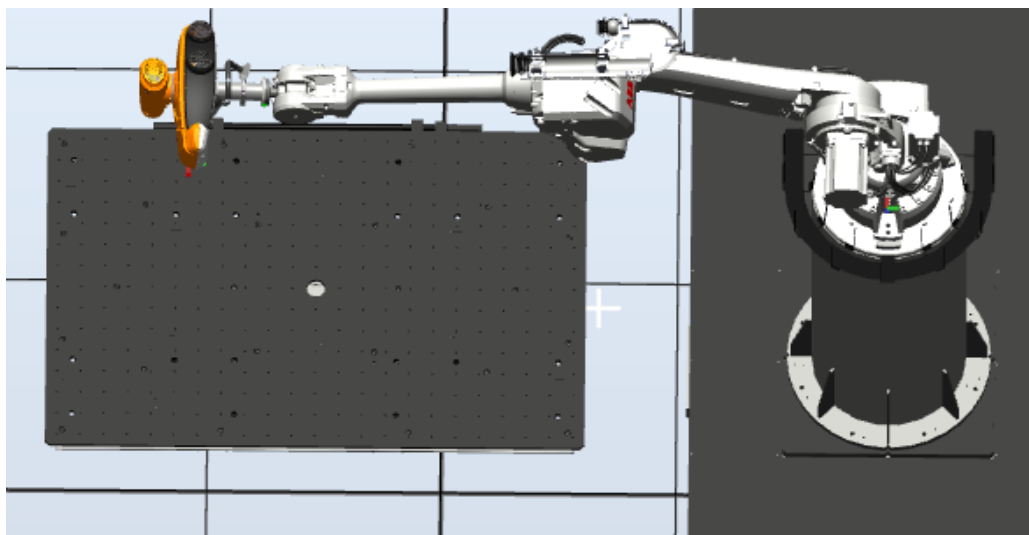
una base per absorbir vibracions, parets, informació de seguretat etc. fins a obtenir el disseny observat en la figura 16.



*Fig. 16. Distribució dels elements mecànics en un entorn tridimensional*

En aquest model virtual es poden observar els diferents sistemes que componen la cèl·lula. La posició en la que es troben les unitats mecàniques té una configuració dels eixos que permet tenir el centre de masses del robot proper a tots els eixos i això ajuda a que els frens no pateixin quan estan activats. Aquest punt es guarda com a punt de repòs o *Home*, i serà la posició del robot quan no estigui en moviment. A part de ser una bona posició per no fer patir els frens, quan s'encén el projector apunta directament a la part alta del robot, evitant així la projecció de llum cap a l'exterior de la cèl·lula o cap a qualsevol operari que pugui estar-hi dins.

El sistema té 7 graus de llibertat gràcies a la introducció de la taula rotatòria, cosa que permet apropar qualsevol punt de la taula a la posició del robot. L'únic punt que no es pot apropar és el centre de la taula així que s'ha de comprovar que el robot pot arribar-hi sense problemes per assegurar que es podran obtenir imatges de qualsevol punt de vista de les peces que s'hi instal·lin. Per a fer això es mou el robot en l'entorn virtual fins a situar-lo en el rang d'acció màxim sobre la taula que li permetin els eixos.



*Fig. 17. Rang d'acció màxim del robot*

En la figura 17 es pot observar la posició del robot quan està en el seu rang màxim. Es pot comprovar que aquesta posició, com s'havia previst en el disseny de la cèl·lula, sobrepassa força el punt central de la taula i per tant permet assegurar que es podran realitzar totes les inspeccions. El fet d'incorporar el capçal al robot amb una brida metàl·lica entremig ajuda a augmentar el rang d'acció però no el suficient si es desitgés modificar el robot per un de més petit. A part, el fet de tenir un robot amb els braços més llargs permet augmentar la velocitat a la que es pot moure l'eina i millorar les configuracions en les que arriba a la zona de treball, allunyant-se de posicions properes a punts singulars.

Per últim es pot valorar els resultats que s'esperen obtenir amb la introducció d'aquesta cèl·lula en el procés productiu de la nau de destí. Com s'ha comentat a l'apartat 1.1, la tecnologia que s'utilitza actualment per realitzar les inspeccions de les peces és la inspecció amb una màquina de mesura per coordenades amb palpador, tècnica que obté els punts del núvol de dades de forma individual. Suposant que la màquina CMM pogués palpar a 2000 Hz, el temps necessari per situar 1 milió de punts són més de 8 minuts

El fet que la màquina CMM utilitzi un palpador tampoc li permet anar a altes velocitats ja que una col·lisió a alta velocitat podria malmetre la peça, l'eina o la màquina així que el moviment al llarg d'una peça que pot arribar a mesurar 2 metres també pot consumir força temps. Per aquest motiu en les màquines CMM es mesuren les diferents entitats utilitzant pocs punts, estratègia que consisteix en reduir moltíssim la informació extreta de la peça fins a la justa per poder fer una inspecció però on els resultats són menys precisos perquè s'extreu informació de tota una superfície o corba a partir de 4 o 5 punts.

Per altra banda un sol digitalitzat del Sidio Airus és capaç de situar fins a 5 milions de punts en l'espai en menys de 5 segons, cosa que permet obtenir tota la informació que es desitgi de la peça que s'està inspeccionant fins i tot des de diferents vistes. Tant la taula com el robot són capaços d'adquirir altes velocitats, la taula pot fer una volta completa en uns 3s i el robot pot arribar a superar els 10 m/s si no se li limita la velocitat. Així doncs, un programa d'inspecció que prengui unes 15 vistes és habitual que trigui uns 2 minuts. Segons el client el temps actual d'inspecció d'una peça de mitjana és d'uns 20 minuts així que la reducció de temps obtinguda amb la cèl·lula actual en un cicle d'inspecció és del 90% (sense comptar temps de càrrega i descàrrega).

A part de millorar els temps de cicle de la inspecció, és important remarcar que la introducció d'una tecnologia de mesura sense contacte permet obtenir molta més informació de la peça a inspeccionar ja que cada mesura afegeix molta informació de la superfície de la peça. Així doncs, els resultats que s'obtinguin amb la nova tecnologia d'inspecció seran millors ja que els càlculs es realitzaran utilitzant moltes més dades que en el cas de les màquines CMM.

Quan el disseny és acceptat pel client, es realitza una llista dels diferents elements que s'han de comprar i es creen les respectives comandes. Aquests elements es porten al taller de Sant Quirze on es fa el muntatge de la cèl·lula i instal·lació de seguretats per una empresa externa.

## 5. Planificació.

Les accions descrites en aquest projecte no representen el global de totes les accions que cal dur a terme en la cèl·lula de metrologia. Per aquest motiu s'ha fet la planificació (Fig. 18) dividint les etapes de les accions descrites en aquest document en blau fosc i les accions que s'han de dur a terme en el futur d'un color blau grisaci.

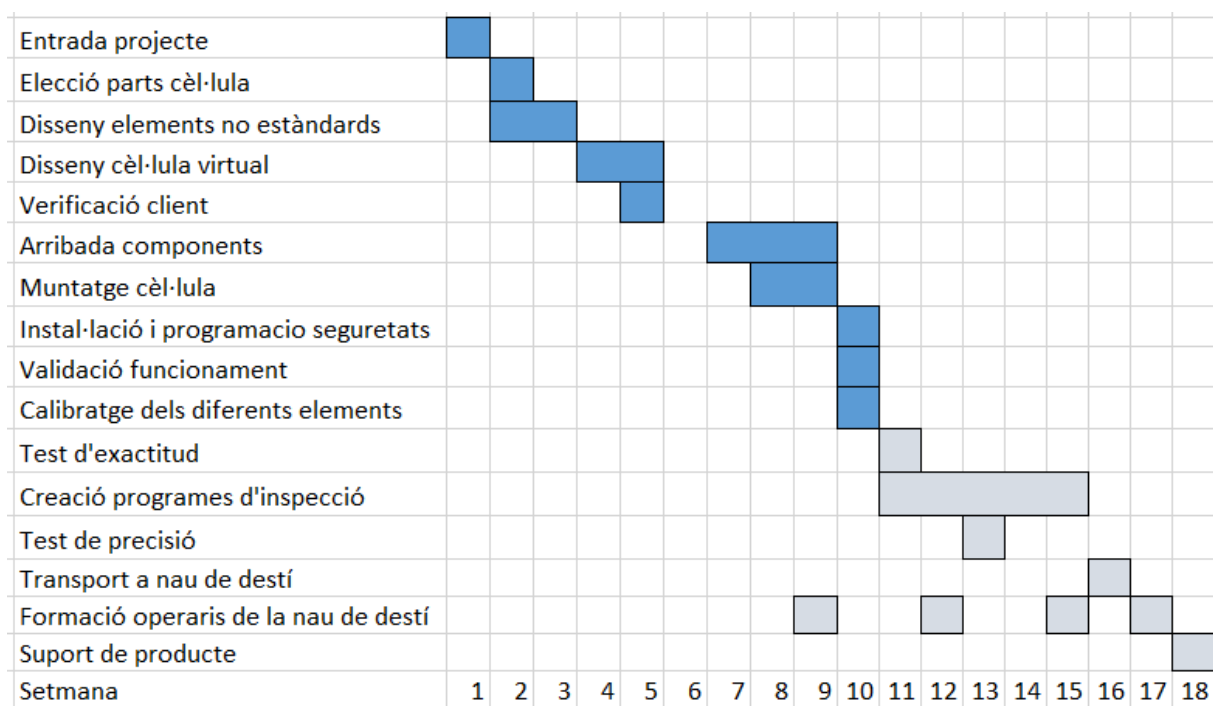


Fig. 18. Diagrama de Gantt amb els temps requerits per l'execució del projecte

En el moment d'entrada del projecte a ABB, l'empresa ha de decidir la solució que ofereix al problema del client. Al ser un disseny des de zero, s'ha de triar els elements que componen la cèl·lula i externalitzar el disseny i fabricació d'aquells que no estan en el catàleg de productes d'ABB com en el cas de la superfície de la taula rotatòria o els utilitatges de fibra de carboni. Un cop feta la distribució en planta es verifica amb el client que el disseny compleix totes les especificacions i es realitza la comanda per enviar tots els elements al taller de Sant Quirze. A mesura que arriben, es va muntant la cèl·lula i es valida que tots els dispositius funcionen correctament.

Més endavant, en un altre projecte s'explica les altres etapes que cal realitzar per tenir la cèl·lula operativa amb alguns programes d'inspecció i certificat de bones mesures.

## 6.Pressupost

El pressupost conté les despeses previstes per l'execució del projecte. En la següent taula es mostren els diferents conceptes de les despeses del projecte i el seu valor. Els números que apareixen són aproximacions ja que per motius de confidencialitat no s'ha tingut accés als valors reals de les despeses

<i>Element</i>	<i>Despesa</i>
<i>Manipulador</i>	22.000 €
<i>Peana</i>	3.000 €
<i>Motor eix extern</i>	1.000 €
<i>Taula rotatòria (estructura i superfície)</i>	9.000 €
<b>Total mecànica</b>	<b>35.000 €</b>
<i>Armari controlador bàsic</i>	7.000 €
<i>Llicència d'opcions sistema operatiu</i>	2.200 €
<i>Targeta comunicació i SafeMove</i>	800 €
<b>Total controlador</b>	<b>10.000 €</b>
<i>Càmera de fotogrametria</i>	40.000 €
<i>Capçal de llum estructurada</i>	70.000 €
<i>Hardware extern de suport a les mesures</i>	22.000 €
<i>SAI</i>	1.200 €
<b>Total equip de mesura</b>	<b>133.200 €</b>
<i>Cables de potència i control del robot</i>	3.000 €
<i>Cables de comunicació capçal-PC</i>	1.800 €
<i>Dressing robot</i>	4.500 €
<i>Cables comunicació controlador</i>	500 €
<b>Total cablejat</b>	<b>9.800 €</b>
<i>Cortina fotoelèctrica</i>	12.000 €
<i>Escàner làser</i>	9.000 €
<i>Semàfor i botons de seguretat</i>	4.000 €
<b>Total seguretat</b>	<b>25.000 €</b>
<b>Personal (disseny i muntatge)</b>	<b>10.000 €</b>
<b>Total pressupost</b>	<b>223.000 €</b>

*Taula 7. Pressupost del projecte per conceptes*

## 7. Impacte ambiental

La cèl·lula de metrologia s'ubicarà dins d'una nau industrial de Suècia, així que no provocarà cap impacte visual o paisatgístic. Segons les característiques dels diferents elements que componen la cèl·lula, el soroll màxim que es pot sentir és menor a 70 dB en les pitjors condicions de treball. L'únic impacte que pot tenir en el personal de la nau és el dany de les retines per culpa del projector del Sidio Airus. Una exposició directe continuada pot arribar a provocar ceguera irreversible.

La petjada de CO<sub>2</sub> del projecte és principalment deguda al diòxid de carboni que s'emet a l'ambient durant l'etapa de transport. S'ha de considerar la distribució dels diferents elements des de l'origen fins a la nau de Sant Quirze del Vallés i el transport de la cèl·lula fins a la nau de destí. Aquests transports es realitzen amb camió per carretera que consumeixen uns 30 litres els 100 km.

El principal risc pel medi ambient que suposa aquest projecte és degut a l'ús de mercuri en la làmpada del projector del Sidio Airus. El tractament incorrecte d'aquest element provoca que s'alliberi mercuri en l'ambient que pot evaporar-se i acabar penetrant en el sòl o en aigües i posteriorment en la biosfera. El mercuri, com altres metalls pesats, pot provocar una forta intoxicació en els animals danyant principalment el sistema digestiu i renal.

La resta d'elements que componen la cèl·lula són habituals en la indústria i estan compostos principalment per metalls que es poden reaprofitar i materials plàstics i vidres que es poden reciclar.

## Conclusions

El projecte descriu els passos a seguir en la realització del disseny d'una cèl·lula robotitzada de metrologia que utilitza una tecnologia de mesura de distància per dur a terme una sèrie de tasques d'inspecció per una companyia del sector de l'automoció que fins ara utilitzava la metodologia d'inspecció per palpador.

Per poder determinar els elements essencials a incloure es va partir d'una fase exploratòria inicial on es va analitzar els elements que incorpora la cèl·lula d'inspecció estandarditzada i es va considerar els dos grans requisits que apareixen degut a les grans dimensions d'algunes de les peces a mesurar: la necessitat d'un robot i una taula més gran que suporti un major pes de les peces i una distribució diferent dels elements perquè en un futur pugui esdevenir una cèl·lula doble.

L'element principal de la cèl·lula de metrologia és el capçal Sidio Airus que conté tots els sistemes necessaris per l'extracció de les dades superficials de la peça a mesurar i la ubicació d'aquestes dades en el volum de treball. El capçal Sidio està situat en la brida d'un robot IRB 4600-40 que és un manipulador força esvelt amb una baula especialment llarga entre els eixos 4 i 5 que permet augmentar el rang de treball fins a 2,55m. El robot està controlat per un sistema IRC5 que conté els elements electrònics necessaris per controlar el manipulador, els eixos addicionals i els equips perifèrics.

La cèl·lula també inclou una taula rotatòria en la que col·locar les peces a inspeccionar on es pot modificar la seva orientació per millorar la configuració de les vistes del robot. Aquesta taula té unes dimensions de 2300 x 1500 mm i un motor MTD 750 que pot aguantar fins a 1000 kg. Per col·locar les peces sempre en la mateixa posició i orientació i per assegurar que no es moguin ni llisquin durant l'etapa d'inspecció s'inclouen uns utilitatges que es fixen a la taula amb uns cargols i que tenen unes pinces o clamps per immobilitzar la peça. Aquests utilitatges són estructures de barres de fibra de carboni ja que ofereixen molta versatilitat i maniobrabilitat.

Per acabar s'han tingut en compte totes les consideracions de seguretat que ha d'introduir la cèl·lula per complir amb la normativa europea. Aplicant aquesta normativa s'aconsegueix que cap operari pugui entrar a la cèl·lula durant l'etapa de moviment i en cas d'accés inesperat el moviment del robot s'aturi. També s'inclouen diverses mesures per poder



aturar el robot en cas de detecció de col·lisió, en cas que el robot surti de l'àrea designada per un software de seguretat anomenat SafeMove i un sistema d'identificació per radiofreqüència que permet minimitzar al màxim el risc d'executar una trajectòria no desitjada.

Després de decidir tots els diferents elements que ha d'incorporar la cèl·lula i les característiques que ha de tenir s'ha dissenyat la seva distribució en planta. Aquesta distribució s'ha realitzat tenint en compte que es pretén ampliar la cèl·lula afegint una taula rotatòria extra en un futur. Per això s'ha situat el robot com a element principal en el centre de la cèl·lula amb espai per a una taula a banda i banda. Posteriorment s'ha passat el disseny a un entorn virtual anomenat RobotStudio en que es pot observar que totes les especificacions es compleixen i que s'utilitza per donar una idea força definitiva al client de com serà la cèl·lula muntada i pot utilitzar-se en projectes futurs en les tasques de programació i verificació de trajectòries.

# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques:

- [1] World standards. *Electricidad en todo el mundo*.  
<<https://worldstandards.eu/electricidad.htm>> [Consulta: 03/05/2018]
- [2] Climate Data. *Datos climáticos en Suecia*. <<https://es.climate-data.org/location/450/>> [Consulta: 03/05/2018]
- [3] Creus Solé, Antonio. *Instrumentación industrial*. Editorial Marcombo. 2011.
- [4] Borbolla metrology. *CMM X-Cite*  
<<http://www.borbollametrology.com/PRODUCTOS1/Wenzel/WENZEL%20Bridge-Type%20CMM%20XC.htm>>. [Consulta: 17/06/2018]
- [5] Metromecánica *Técnicas basadas en láser para metrología de alto rango*.  
<[http://www.forotecnologicoyempresarial.com/wp-content/uploads/2008/12/documentos\\_foro\\_grandes\\_dimensiones\\_03-02%20F\\_Comin%20MTM.pdf](http://www.forotecnologicoyempresarial.com/wp-content/uploads/2008/12/documentos_foro_grandes_dimensiones_03-02%20F_Comin%20MTM.pdf)> [Consulta: 01/06/2018]
- [6] H. Kim, Felix; Villarraga-Gómez, Herminso i Moylan, Shawn. *Inspección de las características internas incorporadas en las piezas metálicas fabricadas aditivamente utilizando la tomografía computerizada con rayos X metrológica*. <[http://www.sariki.es/wp-content/uploads/2017/01/Tomograf%C3%ADa-industrial-en-fabricaci%C3%B3n-aditiva\\_investigaci%C3%B3n.pdf](http://www.sariki.es/wp-content/uploads/2017/01/Tomograf%C3%ADa-industrial-en-fabricaci%C3%B3n-aditiva_investigaci%C3%B3n.pdf)> [Consulta: 01/06/2018]
- [7] Gupta, Mohit; G. Narasimhan, Srinivasa; Agrawal, Amit; Veeraraghavan, Ashok. *Structured Light 3D scanning*. Carnegie Mellon University. 2016.  
<<http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/academic/class/16823-s16/www/T3P5.pdf>> [Consulta: 01/06/2018]
- [8] ABB. *FlexInspect User Manual*. Documentació interna. 2016.
- [9] ABB. *Sidio Airus Maintenance Guide*. Documentació interna. 2014.
- [10] ABB. *Especificaciones del producto. IRB 4600*. Documentació interna. 2016.

- [11] ABB. *Especificaciones del producto. IRB 6620*. Documentació interna. 2016.
- [12] ABB. *Especificaciones del producto. Controlador IRC5*. Documentació interna. 2016.
- [13] ABB. *IRC5. Descripción del entorno*. Documentació interna. 2005.
- [14] ABB. *Product specification. Motor and gear units*. Documentació interna. 2015.
- [15] Departament d'enginyeria de projectes i de la construcció. *Construccions i arquitectura industrial. Lliçó 4: Distribució en planta*. ETSEIB. 2015.
- [16] Departamento de Economía, Hacienda y Empleo. *Guía técnica de seguridad en robótica..* 2012. Gobierno de Aragón.
- [17] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. *Sistemas de automatización y robótica para las pymes españolas*. Gobierno de España. 2015.
- [18] Roldán Vilorio, José. *Seguridad en las instalaciones eléctricas*. Ediciones Paraninfo. 2003.
- [19] ABB. *Manual del operador. Información general de seguridad*. Documentació interna. 2016

#### Bibliografía consultada:

Renishaw resource center. *CMM inspection fundamentals*. <  
<http://resources.renishaw.com/en/download/cmm-inspection-fundamentals--6855>>[Consulta: 20/05/2018]

ABB. *Manual de aplicaciones. SafeMove 2*. Documentació interna. 2016.

ABB. *Manual del operario. Información general de seguridad*. Documentació interna. 2016.

BOE. *Directiva 2006/42/CE relativa a les màquines*. 2006.  
 <<https://boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2006-81063>> [Consulta: 25/05/2018]

BOE. *Directiva 2014/35/UE en matèria de comercialització de material elèctric destinat a utilitzar-se amb determinats límits de tensió*. 2014.  
<<https://boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2014-80628>> [Consulta: 25/05/2018]

BOE. *Directiva 2014/30/UE en matèria de compatibilitat electromagnètica*. 2014.  
<[https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-4442](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-4442)> [Consulta: 25/05/2018]